

Comportement sous basses températures des composés en élastomère utilisés dans les isolateurs sismiques de ponts

Par

Djamel ANKIK

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 09 JUILLET 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Lotfi Guizani, ing., Ph.D., directeur de mémoire
Département de génie de construction à l'École de technologie supérieure

M. Gabriel Lefebvre, ing., Ph.D., président du jury
Département de génie de construction à l'École de technologie supérieure

M. Amar Khaled, ing., Ph.D., membre du jury
Département de génie de construction à l'École de technologie supérieure

M. Hassan Fatemi, ing., Ph.D., examinateur externe
GOODCO Z-TECH (CANAM-PONTS)

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 28 JUIN 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à adresser mes remerciements à mon directeur de recherche M. Lotfi Guizani de m'avoir offert la possibilité de travailler dans le contexte de ses programmes de recherche. Outre ses qualités scientifiques, je le remercie aussi pour sa disponibilité, ses conseils et son soutien financier. Je tiens à remercier, également, l'entreprise Goodco Z-Tech d'avoir contribué dans le financement du projet de recherche dans le cadre du programme Mitacs.

Merci aux techniciens du Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB), Francis Bilodeau et Sylvain Bibeau pour leur disponibilité, leur aide et les conseils durant les essais.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury, le Professeur Gabriel Lefebvre, le Professeur Amar Khaled et M. Hassan Fatemi d'avoir accepté de prendre part à mon jury.

Finalement, une pensée reconnaissante va enfin vers toute ma famille et mes amis.

COMPOTEMENT SOUS BASSES TEMPÉRATURES DES COMPOSÉS EN ÉLASTOMÈRE UTILISÉS DANS LES ISOLATEURS SISMQUES DE PONTS

Djamel ANKIK

RÉSUMÉ

Les systèmes d'isolation sismique à base d'élastomères sont des plus utilisés pour protéger les structures de ponts des séismes. Leur utilisation permet d'introduire une flexibilité latérale contrôlée au niveau du lien entre la superstructure et l'infrastructure (piles/culées) et un amortissement additionnel au besoin. Ces systèmes peuvent être groupés en trois types : isolateur en élastomère fretté (RB), isolateur en élastomère à amortissement élevé (HDRB) et isolateur en élastomère à noyau de plomb (LRB). Ils sont typiquement composés d'une succession de couches d'élastomères et plaques en acier minces avec un noyau de plomb pour le LRB. Les élastomères permis et utilisés au Canada sont à base de polyisoprène (caoutchouc naturel (NR)) ou de polychloroprène (néoprène (CR)). Une formulation à base de caoutchouc naturel avec des additifs permet d'obtenir un composé caractérisé par un amortissement élevé, dit HDNR, permettant une plus grande dissipation d'énergie sismique par hystérésis. Or, le comportement de ces élastomères est fortement influencé par les basses températures, telles celles rencontrées au Canada. Elles causent des augmentations de la rigidité et de l'aire de la courbe d'hystérésis des élastomères, entraînant de ce fait des changements dans les propriétés mécaniques des isolateurs sismiques et impactant ainsi la protection sismique des ouvrages.

Dans cette étude, le comportement mécanique sous basses températures de trois formulations d'élastomères déjà utilisés et/ou en développement pour des applications d'isolation sismique au Canada, de type NR et HDNR, est étudié expérimentalement. Les tests sont conduits sur des échantillons d'élastomère à échelle réduite soumis à des cycles de charge/décharge en cisaillement à plusieurs niveaux de déformations (25 à 150%), après exposition à différentes températures (20°C, -8°C et -30°C) pour différentes durées de conditionnement (15 minutes à 14 jours). En outre, l'effet des basses températures sur la réponse sismique des ponts isolés avec isolateurs en élastomères de type LRB et HDRB est étudié numériquement. À cet effet, des analyses dynamiques non linéaires sont réalisées sur une structure de pont, modélisée par un système à un degré de liberté, en considérant les propriétés nominales (à température ambiante, soit 20°C) et modifiées dues aux basses températures. Les résultats de l'étude expérimentale montrent que le caoutchouc naturel à faible amortissement (NR) subit moins de rigidification instantanée et globale que les deux composés à amortissement élevé (HDNR). Cependant, il est plus sensible à la durée d'exposition (phénomène de cristallisation) à très basses températures. Les résultats des analyses temporelles indiquent que les basses températures peuvent entraîner des augmentations considérables des forces sismiques transmises par le système d'isolation à la sous-structure d'un pont. L'augmentation de ces forces dépend fortement du type et formulation chimique de l'élastomère, et est plus importante pour les élastomères du type HDNR que pour le type NR.

Mots clés : élastomère, isolateurs sismiques, propriétés hystérétiques, basses températures, réponse sismique des ponts isolés.

LOW-TEMPERATURE BEHAVIOUR OF ELASTOMER COMPOUNDS USED IN BRIDGE SEISMIC ISOLATION BEARINGS

Djamel ANKIK

ABSTRACT

Elastomeric seismic base-isolation systems are widely used to protect bridge structures from earthquake damage. Their use allows the introduction of controlled lateral flexibility at the link between the superstructure and the substructure (piers/abutments) and additional damping if needed. These systems may be classified into three types: Elastomeric isolators (RB), high damping elastomeric isolator (HDRB), and lead rubber isolators (LRB). They are typically composed of a succession of elastomer layers and thin steel plates with a lead core for the LRB. Elastomer compounds permitted and used in Canada are based on polyisoprene (natural rubber (NR)) or polychloroprene (synthetic rubber known as neoprene (CR)). A natural rubber-based formulation with additives provides a high damping rubber compound, referred to as HDNR, for an enhanced seismic energy dissipation capacity. However, the behaviour of these elastomers is strongly influenced by low temperatures, such as those encountered in Canada. They cause increases in the stiffness and the hysteresis response of elastomers, thereby causing changes in the mechanical properties of seismic isolators and thus influencing the seismic protection of structures.

In this study, the mechanical behaviour under low temperatures of three elastomer formulations made of NR and HDNR already used and/or in development for seismic isolation applications in Canada is experimentally studied. The tests are conducted on reduced scale elastomer samples subjected to shear loading cycles at several levels of deformation (25 to 150%), after exposure to different temperatures (20°C, -8°C and -30 ° C) for different conditioning durations (15 minutes to 14 days). In addition, the effect of low temperatures on the seismic response of isolated bridges with elastomer isolators composed of LRB and HDRB type is numerically studied. To this end, nonlinear dynamic analyses were performed on a bridge structure, modeled by a single degree of freedom, considering the nominal properties (at room temperature, namely 20°C) and modified due to the low temperatures. The results of experimental study show that low damping natural rubber (NR) experiences less instantaneous and overall stiffening due to low temperature than the two high damping rubber compounds (HDNR) studied. However, it is more sensitive to the duration of exposure to very low temperatures (crystallization phenomenon). The results of the numerical analyzes demonstrate that the low temperatures effects on elastomeric isolation bearings can result into considerable increases in the seismic forces transmitted by the isolation system to the substructure of a bridge. The increase of these forces depends strongly on the type and chemical formulation of the elastomer, and is more important for HDNR elastomers type than for NR type.

Keywords: elastomers, seismic isolators, hysteretic properties, low temperatures, seismic response of isolated bridges.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	7
1.1 Principe de l'isolation sismique de la base	7
1.2 Systèmes d'isolations sismiques de la base des ponts	9
1.2.1 Système d'isolation à base de glissement	9
1.2.1.1 Pendule de friction	9
1.2.1.2 L'isolateur Eradiquake	10
1.2.1.3 L'isolateur Izolotech	11
1.2.2 Systèmes d'isolations à base d'élastomère	11
1.2.2.1 Isolateurs en élastomère fretté (RB)	11
1.2.2.2 Isolateurs en élastomère fretté à amortissement élevé (HDRB)	12
1.2.2.3 Isolateurs en élastomère fretté à noyau de plomb (LRB)	13
1.3 Modélisation des isolateurs à base d'élastomère	14
1.4 Matériaux composants les isolateurs à base d'élastomère fretté	17
1.4.1 Le caoutchouc	17
1.4.1.1 Le caoutchouc naturel	17
1.4.1.2 Le néoprène	18
1.4.1.3 Propriétés mécaniques du caoutchouc	19
1.4.2 Le plomb	24
1.4.3 Les plaques d'acier	25
1.5 Facteurs influençant les propriétés des isolateurs à base d'élastomère	25
1.5.1 Le vieillissement	25
1.5.2 Le scragging et recouvrement	26
1.5.3 Effet des basses températures	27
1.5.3.1 Raidissement thermique instantané	28
1.5.3.2 Cristallisation à basse température	28
1.5.3.3 Brève revue de quelques recherches expérimentales antérieures	31
1.6 Facteurs de modification de propriétés mécaniques des isolateurs	47
CHAPITRE 2 PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	51
2.1 Introduction	51
2.2 Description des spécimens	51
2.3 Choix des températures des essais	54
2.4 Paramètres de l'étude et plan expérimental	55
2.4.1 Évaluer l'effet du réchauffement durant les cycles initiaux d'amplitude croissante	57
2.4.2 Isoler l'effet du recouvrement après scragging	59
2.5 Description de l'appareillage	62

2.6	Procédure des essais.....	64
CHAPITRE 3 DESCRIPTION ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....		67
3.1	Introduction.....	67
3.2	Caoutchouc naturel à faible amortissement, composé NAT55.....	69
3.2.1	Courbes d'hystérésis	69
3.2.2	Influence du nombre de cycles de chargement	75
3.2.3	Effet de la durée de conditionnement et du niveau de déformation sur les caractéristiques mécaniques	76
3.2.4	Cristallisation à basse température.....	81
3.3	Caoutchouc naturel à amortissement élevé, composé B.....	83
3.3.1	Recouvrement des propriétés.....	83
3.3.2	Courbes d'hystérésis	84
3.3.3	Influence du nombre de cycles de chargement	88
3.3.4	Effet de la durée de conditionnement et du niveau de déformation sur les caractéristiques mécaniques	89
3.3.5	Cristallisation à basse température.....	93
3.4	Caoutchouc naturel à amortissement élevé, composé E	95
3.4.1	Recouvrement des propriétés.....	95
3.4.2	Courbes d'hystérésis	96
3.4.3	Influence du nombre de cycles de chargement	100
3.4.4	Effet de la durée de conditionnement et du niveau de déformation sur les caractéristiques mécaniques	100
3.4.5	Cristallisation à basse température.....	105
3.5	Discussion des résultats	106
3.5.1	Effet du raidissement thermique instantané.....	107
3.5.2	Effet de la cristallisation à basse température.....	109
3.5.3	Proposition de facteurs de modifications des propriétés.....	110
CHAPITRE 4 EFFET DES BASSES TEMPÉRATURES SUR LA RÉPONSE SISMIQUE DES PONTS ISOLÉS AVEC ISOLATEURS EN ÉLASTOMÈRES.....		115
4.1	Introduction.....	115
4.2	Expression numérique des résultats expérimentaux	116
4.3	Conception des systèmes d'isolations : méthode simplifiée du code CSA, (2014a)	119
4.4	Effet des basses températures sur les propriétés des isolateurs sismiques.....	121
4.5	Analyses dynamiques temporelles non linéaires	122
4.5.1	Accélérogrammes	122
4.5.1.1	Calibration des séismes historiques	123
4.5.1.2	Sélection et calibration des séismes artificiels.....	124

4.6	Résultats	127
4.6.1	Système d'isolation en LRB	127
4.6.1.1	Réponse tenant compte de l'effet du raidissement thermique instantané	127
4.6.1.2	Réponse tenant compte de l'effet de la cristallisation à basse température	130
4.6.2	Système d'isolation en HDRB	134
4.6.2.1	Réponse tenant compte de l'effet du raidissement thermique instantané	134
4.6.2.2	Réponse tenant compte de l'effet de la cristallisation à basse température	136
4.7	Interprétation des résultats	139
	CONCLUSION	143
	RECOMMANDATIONS	147
	BIBLIOGRAPHIE	148

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Facteurs de modification des propriétés pour le vieillissement49
Tableau 1.2	Facteurs de modification des propriétés pour la température49
Tableau 1.3	Facteurs de modification des propriétés pour le scragging.....49
Tableau 2.1	Résultats des tests de base exigés dans le code CSA, 2014a53
Tableau 2.2	Paramètres et séquences des essais du composé NAT55.....60
Tableau 2.3	Paramètres et séquences des essais des composés B et E61
Tableau 3.1	Effets du nombre de cycles de charge et la température sur le module de cisaillement effectif pour le composé NAT5576
Tableau 3.2	Effets du nombre de cycles de charge et la température sur le module de cisaillement effectif pour le composé B88
Tableau 3.3	Effet du nombre de cycles de charge et la température sur le module de cisaillement effectif pour le composé E100
Tableau 4.1	Valeurs des constantes des équations caractérisant l'effet du raidissement thermique instantané117
Tableau 4.2	Valeurs des constantes des équations caractérisant l'effet de la cristallisation à basse température118
Tableau 4.3	Propriétés hystérétiques des systèmes d'isolations120
Tableau 4.4	Séismes historiques choisis pour les analyses ainsi que leurs caractéristiques.....123
Tableau 4.5	Séismes artificiels sélectionnés des scénarios 1 et 2 pour les analyses.....127

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Effet de l'allongement de la période et augmentation de l'amortissement sur a) les forces sismiques ; b) les déplacements sismiques8
Figure 1.2	Système de pendule de friction10
Figure 1.3	Isolateur Eradiquake10
Figure 1.4	Schéma de l'isolateur Izolotech11
Figure 1.5	Schéma typique d'un isolateur en élastomère fretté12
Figure 1.6	Courbe force-déplacement d'un isolateur en élastomère fretté à amortissement élevé13
Figure 1.7	Schéma d'un isolateur en élastomère fretté à noyau de plomb14
Figure 1.8	Modèle analytique bilinéaire pour isolateurs à base d'élastomères.....15
Figure 1.9	Polymérisation du polyisoprène.....18
Figure 1.10	Polymérisation du polychloroprène18
Figure 1.11	Loi contrainte-déformation d'un caoutchouc naturel en traction20
Figure 1.12	Compressibilité du caoutchouc21
Figure 1.13	Essai pleine échelle pour déterminer le module de cisaillement22
Figure 1.14	Spécimen Quad-Shear standard22
Figure 1.15	Configuration des essais (a) cisaillement simple (b) combiné en compression et cisaillement23
Figure 1.16	Comportement d'élastomère sous basses températures28
Figure 1.17	Structure moléculaire d'un élastomère partiellement cristallisé30
Figure 1.18	Variation de la vitesse de cristallisation du caoutchouc naturel en fonction de la température30

Figure 1.19	Variation de la rigidité en cisaillement normalisée avec le temps d'exposition à différentes températures (a) néoprène et (b) caoutchouc naturel.....	32
Figure 1.20	Effet de la variation de température sur la rigidité en cisaillement normalisée du néoprène	33
Figure 1.21	Définition des rigidités latérales pour (a) RB et (b) LRB	34
Figure 1.22	Coupe transversale des appuis (dimensions en mm)	35
Figure 1.23	Courbes forces-déplacements du NEO150 sous température de -20°C	36
Figure 1.24	Variation du module de cisaillement normalisée en fonction de la durée de conditionnement aux basses températures	37
Figure 1.25	Variation du module de cisaillement en fonction de la durée de conditionnement à -20°C	38
Figure 1.26	Courbes force-déplacement de l'isolateur RB testé à 20°C et à -26°C	39
Figure 1.27	Courbes force-déplacement de l'isolateur LRB testé à 20°C et à -26°C	39
Figure 1.28	Définition des caractéristiques mécaniques des élastomères.....	41
Figure 1.29	Courbes contrainte-déformation de l'élastomère H1 à des températures : (a) 40°C, (b) 20°C, (c) 10°C, (d) 0°C, (e) -10°C et (f) -20°C	42
Figure 1.30	Courbes contrainte-déformation de l'élastomère N1 à des températures : (a) 40°C, (b) 20°C, (c) 10°C, (d) 0°C, (e) -10°C et (f) -20°C	42
Figure 1.31	Courbes contrainte-déformation de l'élastomère SN1 à des températures : (a) 40°C, (b) 20°C, (c) 10°C, (d) 0°C, (e) -10°C et (f) -20°C	43
Figure 1.32	Variation des propriétés mécaniques des élastomères H1, N1 et SN1 en fonction de la température pour les différentes amplitudes de déformation imposées	44
Figure 1.33	Variation des propriétés mécaniques des élastomères H1, N1 et SN1 en fonction de l'amplitude de déformation pour les différentes températures.....	45

Figure 1.34	Courbes contrainte-déformation de l'élastomère H1 après 1, 4, 8 et 24 h de conditionnement à (a) -20°C et (b) -10°C.....	46
Figure 1.35	Variation des propriétés mécaniques des élastomères H1, N1 et SN1 en fonction de la durée de conditionnement à -20°C pour différentes amplitudes de déformation.....	47
Figure 1.36	Propriétés maximales et minimales du système d'isolation pour analyse.....	48
Figure 2.1	Plan montrant les dimensions des spécimens d'essai (mm)	52
Figure 2.2	Photo des spécimens typiques testés.....	52
Figure 2.3	Cartographie des températures moyennes journalières minimales du Canada.....	55
Figure 2.4	Courbe des déformations cycliques sinusoïdales imposées.....	56
Figure 2.5	Augmentation de la température interne du composé NAT55 durant le chargement cyclique incrémental à température de -8°C	58
Figure 2.6	Augmentation de la température interne du composé NAT55 durant le chargement cyclique incrémental à température de -30°C	58
Figure 2.7	Montage expérimental : presse MTS équipée d'une enceinte thermique a) vue extérieure, b) vue intérieure avec spécimen et thermocouples installés.....	63
Figure 2.8	Conditionnement des spécimens dans la chambre réfrigérée	63
Figure 2.9	Courbe du réchauffement d'appui en élastomère refroidi jusqu'à -30°C	65
Figure 3.1	Spécimen d'essai à l'état déformé.....	67
Figure 3.2	Détermination des caractéristiques mécaniques des élastomères	69
Figure 3.3	Courbes d'hystérésis du composé NAT55 à 20°C et à -8°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j	70
Figure 3.4	Courbes d'hystérésis du composé NAT55 à 20°C et à -30°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j	71
Figure 3.5	Superposition des courbes d'hystérésis du composé NAT55 obtenus à 20°C et à -8°C après 15 min et 14 j de conditionnement	72

Figure 3.6	Superposition des courbes d'hystérésis du composé NAT55 obtenus à -30°C après 15 min et 14 j de conditionnement73
Figure 3.7	Superpositions des courbes d'hystérésis du spécimen (gris) soumis directement à 150% de déformation et le spécimen (noire) soumis au chargement incrémental d'essais effectués à -8°C74
Figure 3.8	Superpositions des courbes d'hystérésis du spécimen (gris) soumis directement à 150% de déformation et le spécimen (noire) soumis au chargement incrémental d'essais effectués à -30°C.....74
Figure 3.9	Effets de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé NAT55 testé à -8°C79
Figure 3.10	Effets de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé NAT55 testé à -30°C80
Figure 3.11	Courbes de cristallisation du composé NAT55 pour les différentes amplitudes de déformations appliquées (a) à -8°C et (b) à -30°C82
Figure 3.12	Recouvrement des propriétés vierge du composé B après 14 j de conditionnement à -8°C84
Figure 3.13	Recouvrement des propriétés vierge du composé B après 14 j de conditionnement à -30°C84
Figure 3.14	Courbes d'hystérésis du composé B à 20°C et à -8°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j86
Figure 3.15	Courbes d'hystérésis du composé B à 20°C et à -30°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j87
Figure 3.16	Effet de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé B testé à -8°C.....91
Figure 3.17	Effet de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé B testé à -30°C.....92
Figure 3.18	Courbes de cristallisation du composé B pour les différentes amplitudes de déformations appliquées (a) à -8°C et (b) à -30°C94
Figure 3.19	Recouvrement des propriétés vierge du composé E après 14 j de conditionnement à température de -8°C96
Figure 3.20	Recouvrement des propriétés vierge du composé E après 14 j de conditionnement à température de -30°C96

Figure 3.21	Courbes d'hystérésis du composé E à 20°C et à -8°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j98
Figure 3.22	Courbes d'hystérésis du composé E à 20°C et à -8°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j99
Figure 3.23	Effet de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé E testé à -8°C103
Figure 3.24	Effet de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé E testé à -30°C104
Figure 3.25	Courbes de cristallisation du composé E pour les différentes amplitudes de déformations appliquées (a) à -8°C et (b) à -30°C106
Figure 3.26	Augmentation de la rigidité due au raidissement thermique instantané pour les différentes amplitudes de déformation à -8°C108
Figure 3.27	Augmentation de la rigidité due au raidissement thermique instantané pour les différentes amplitudes de déformation à -30°C109
Figure 3.28	Comparaison des facteurs de modification du composé NAT55 obtenus dans cette étude avec ceux donnés par le code AASHTO 2010111
Figure 3.29	Comparaison des facteurs de modification obtenus dans cette étude avec ceux donnés par le code AASHTO 2010 (a) composé B (b) composé E112
Figure 4.1	Tendance du module de cisaillement effectif normalisé caractérisant l'effet de la cristallisation à -30°C et 100% de déformation.....118
Figure 4.2	Tendance de la contrainte à déformation cyclique nulle normalisée caractérisant l'effet de la cristallisation à -30°C et 100% de déformation.....119
Figure 4.3	Spectres cible et des séismes historiques choisis après calibration124
Figure 4.4	Spectre cible ainsi que les spectres individuels et moyens après calibration126
Figure 4.5	Variation de la force maximale à la base en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24 h du LRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques129

Figure 4.6	Variation du déplacement maximal en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24 h du LRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques.....	130
Figure 4.7	Variation de la force maximale à la base en fonction de la durée de conditionnement à -30°C du LRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques	132
Figure 4.8	Variation du déplacement maximal en fonction de la durée de conditionnement à -30°C du LRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques	133
Figure 4.9	Variation de la force maximale à la base en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24h du HDRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques	135
Figure 4.10	Variation du déplacement maximal en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24h du HDRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques.....	136
Figure 4.11	Variation de la force maximale à la base en fonction de la durée de conditionnement à -30°C du HDRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques	138
Figure 4.12	Variation du déplacement maximal en fonction de la durée de conditionnement à -30°C du HDRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques	139

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

NR	Naturel Rubber (caoutchouc naturel)
CR	Neoprene (Néoprène)
HDNR	High Damping Naturel Rubber (caoutchouc naturel à amortissement élevé)
RB	Rubber Beraing (isolateur en élastomère fretté)
HDRB	High Damping Rubber Beraing (isolateur en élastomère à amortissement élevé)
LRB	Lead Rubber Beraing (isolateur en élastomère à noyau de plomb)
CFC	Cubique Face Centrée
DDL	Degré De Liberté
EDC	Énergie Dissipée par Cycle
CSA	Canadian Standards Association
3D	Trios Dimensions
IRHD	International Rubber Hardness Degree

Alphabet romain minuscule

t_r	Épaisseur d'un bloc d'élastomère
-------	----------------------------------

Alphabet romain majuscule

A	Aire d'un bloc d'élastomère
A_L	Aire du noyau de béton
A_r	Aire transversale d'un isolateur en élastomère
D	Déplacement en cisaillement
E_C	Aire d'un cycle de charge complet de la courbe contrainte-déformation
F_y	Force élastique limite
F_{max}	Force maximal
G_r	Module de cisaillement de l'élastomère
G_{eff}	Module de cisaillement effectif
G_{sec}	Module de cisaillement sécant

H1	Élastomère dur provenant de l'usine 1
H2	Élastomère dur provenant de l'usine 2
K	Module de compressibilité
K_{eff}	Rigidité effective
K_d	Rigidité post-élastique
K_u	Rigidité élastique
N1	Élastomère normal provenant de l'usine 1
N2	Élastomère normal provenant de l'usine 2
P	Pression hydrostatique
P_T	Propriétés mécanique de l'élastomère en fonction de la température
$P_{D_{100}^{-30}}$	Propriétés mécanique de l'élastomère en fonction de la durée
Q_d	Résistance caractéristique
$S_T(T)$	Accélérations du spectre cible
$S_g(T)$	Accélérations spectrales des spectres des accélérogrammes choisis
SN1	Élastomère normal-doux provenant de l'usine 1
SN2	Élastomère normal-doux provenant de l'usine 2
T	Période de vibration
T_{isol}	Période fondamentale d'isolation
T_r	Hauteur total des isolateurs en élastomère
T_M	Température de fusion du plomb
T°	Température
V_0	Volume initiale d'élastomère
ΔV_0	Changement du volume d'élastomère
W	Poids sismique du pont

Alphabet grec minuscule

τ	Contrainte de cisaillement
τ_{max}	Contrainte de cisaillement maximale
τ_{min}	Contrainte de cisaillement minimale
τ_0	Contrainte de cisaillement à déformation nulle

γ	Déformation de cisaillement
γ_{max}	Déformation maximale de cisaillement
γ_{min}	Déformation minimale de cisaillement
ξ_{eq}	Amortissement visqueux équivalent
λ_{min}	Facteur de modification des propriétés minimal
λ_{max}	Facteur de modification des propriétés maximal
λ_{Geff}	Facteur de modification du module de cisaillement effectif
λ_{τ_0}	Facteur de modification de la contrainte à déformation cyclique nulle
σ_{yL}	Contrainte élastique limite du plomb

Alphabet grec majuscule

Δ_{max}	Déplacement maximal
Δ_y	Déplacement élastique limite

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

m	mètre (unité de base)
s	seconde (unité de temps)
Aire	
m²	mètre carré
mm²	millimètre carré

UNITÉS DE TEMPS

h	heure
min	minute
s	seconde
Fréquence	
Hz	Hertz
kHz	kilo Hertz

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

Longueur

m	mètre
mm	millimètre

UNITÉS MÉCANIQUES

Vitesse

km/s	kilomètre par seconde
-------------	-----------------------

Accélération

m/s²	mètres par secondes au carré
g	accélération moyenne de la pesanteur

Force

N	Newton
kN	kilo Newton

Rigidité

kN/mm	kilo Newton par millimètre
--------------	----------------------------

UNITÉS CALORIFIQUES

°C	degré Celsius
-----------	---------------

Contrainte de cisaillement

Pa	Pascal
MPa	megaPa
psi	pound-force per square inch

INTRODUCTION

Contexte et problématique

Les séismes sont des phénomènes naturels qui se manifestent notamment par des mouvements oscillatoires de la surface du sol causés par des ruptures de la croûte terrestre. Les structures de génie civil, comme les ponts, soumises à ces secousses doivent être capables de résister à ces mouvements sans dommages ou, du moins, limiter les dommages subis selon des critères de performances préétablis. L'un des moyens efficaces utilisés pour la protection sismique de ces structures est l'isolation sismique de la base. Le principe consiste à créer un lien flexible latéralement entre la superstructure du pont et ses unités de fondations, permettant, ainsi, d'allonger la période de vibration naturelle du pont, dans la direction latérale isolée, et par conséquent, réduire la demande sismique à laquelle il doit résister. Ceci est éventuellement combiné à une augmentation de l'amortissement induit mécaniquement dans la structure, au moyen de dissipation d'énergie. L'isolation sismique de la base s'avère efficace non seulement pour les nouveaux ponts, mais également pour la réhabilitation sismique des ponts existants, en vue d'augmenter leur résistance face aux séismes. Dans le cas des ponts, ceci est assuré par le recours à un système d'isolation sismique, lequel est composé d'appuis spéciaux, mis entre le tablier et les piles/culées (D. Cardone & Gesualdi, 2012). Ces appuis servent également à titre d'appuis ordinaires, pour reprendre les charges et déplacements dans les conditions, plus courantes de service, hors séisme.

Parmi les systèmes d'isolation sismique pour les ponts, les systèmes à base d'élastomères sont des plus largement employés à cause de leurs faibles coûts et excellentes performances (Guizani, 2003, 2007; Naeim & Kelly, 1999). Ils sont constitués, principalement, d'une alternance de couches d'élastomère (caoutchouc) et lamelles d'aciers appelées « frettes ». Les élastomères utilisés dans la construction d'appuis et isolateurs sismiques pour les ponts sont, le cas échéant, à base de polyisoprène (caoutchouc naturel (NR)) ou de polychloroprène (ou le néoprène (CR) par son nom commercial). L'une des limitations du caoutchouc naturel

pour les applications à titre d'isolateur sismique est sa faible capacité de dissipation d'énergie par hystérésis, résultant en des taux d'amortissement équivalents variant typiquement autour de 4 à 6% (Calvi & Kawashima, 2007). Cette faible dissipation d'énergie peut entraîner des déplacements sismiques importants qui résultent de l'allongement de la période de vibration de la structure. Ainsi, pour palier à cette limitation, d'autres formulations à base de caoutchouc naturel avec des additifs permettent d'obtenir un composé caractérisé par un amortissement plus élevé, dit HDNR (High Damping Natural Rubber), permettant une plus grande capacité de dissipation d'énergie et d'amortissement induit par hystérésis. Ces composés sont caractérisés par des taux d'amortissement compris entre 8 et 16% de l'amortissement critique (Taylor & Igusa, 2004). Cependant, le comportement mécanique de ces élastomères est fortement influencé par les basses températures (D. Cardone & Gesualdi, 2012; Constantinou, Whittaker, Kalpakidis, Fenz, & Warn, 2007; Roeder, Stanton, & Feller, 1990; Yakut & Yura, 2002). Ces dernières causent des augmentations de la rigidité de l'élastomère, entraînant de ce fait une diminution de la flexibilité des isolateurs et en conséquence réduisant leur capacité de protection sismique en termes de réduction de la demande sismique en force.

Objectifs

L'objectif principal de ce projet de recherche consiste à évaluer expérimentalement l'effet de l'exposition à de basses températures sur le comportement d'élastomères couramment utilisés dans la fabrication des isolateurs sismiques. Cet objectif global se décline en les objectifs spécifiques suivants :

1. Quantifier les effets des basses températures et de la durée de conditionnement sur les propriétés hystérétiques sous déformations cycliques en cisaillement, de trois formulations d'élastomères à base de caoutchouc naturel de type NR et HDNR ;
2. Développer des courbes de caractérisation de l'effet des basses températures propres aux élastomères testés en fonction de la température et du temps d'exposition, sur la base des résultats obtenus ;

3. Investiguer et ressortir les différences au niveau du comportement sous basses températures du NR et HDNR ;
4. Évaluer l'effet des basses températures sur la réponse sismique des ponts isolés avec isolateurs à base d'élastomères.

Méthodologie

La méthodologie suivie pour traiter la problématique de l'étude et atteindre les objectifs posés se résume en les étapes suivantes :

1. Afin de maîtriser le sujet de recherche, une revue de la littérature a été réalisée. Cette revue s'est concentrée sur les isolateurs à base d'élastomères et les propriétés des matériaux qui les composent. Les facteurs qui influent sur les propriétés des élastomères et isolateurs/appuis en élastomères ont été étudiés, en mettant l'emphasis sur l'effet des basses températures, le phénomène de la cristallisation, les méthodes d'essais et les résultats d'études antérieurs reliées à la présente ;
2. Un programme expérimental a été mis au point. Ce programme prévoit la mise à l'essai cyclique en cisaillement de spécimens d'élastomère, fait de trois formulations de type NR et HDNR, après les avoir conditionnés sous différentes basses températures pour différentes durées d'exposition. Un montage expérimental a été mis au point et des spécimens d'essai ont été conçus à cet effet ;
3. Le programme expérimental a été réalisé et les résultats obtenus ont été analysés et traités ;
4. Des équations empiriques, basées sur les résultats expérimentaux obtenus, sont proposées pour prédire les changements des propriétés hystérétiques en fonction de la basse température et de la durée d'exposition pour chaque matériau ;
5. Un pont type régulier, de deux travées et situé à Montréal, a été considéré pour des fins d'exploration numérique. Le système d'isolation de la base de ce pont a été conçu et un modèle numérique de base à un seul degré de liberté, représentant le pont isolé, a été

élaboré. Les propriétés des variantes du système d'isolation ont été ajustées pour tenir compte des effets des basses températures, dérivées des observations expérimentales ;

6. Des analyses temporelles non linéaires des modèles de ponts en considérant les propriétés des systèmes d'isolations avec et sans effet des basses températures ont été effectuées afin d'étudier la performance de chacun des élastomères sous basses températures. Des accélérogrammes historiques et synthétiques représentant les régions de l'Est du Canada et calibrés sur le spectre du site ont été utilisés dans ces analyses.

Limites de l'étude

Le présent travail de recherche se limite à l'étude de trois formulations, dont une actuellement utilisée au Canada. Les résultats expérimentaux, quoique très instructifs, ne peuvent être directement appliqués sans réserve à d'autres formulations. Aussi, la présente étude réutilise certains mêmes spécimens plusieurs fois. L'effet des cycles antérieurs n'a pas été pris en compte et a été considéré négligeable. Cette hypothèse, communément adoptée par des travaux antérieurs, mérite vérification.

Les résultats numériques doivent être interprétés dans leur contexte. Ils sont limités à un site, un pont et des matériaux particuliers. Ils permettent de quantifier l'ampleur de l'effet de la basse température dans la région de l'Est du Canada mais ne peuvent être généralisés sans précaution à d'autres sites, systèmes d'isolations et types de ponts.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est constitué de quatre chapitres en plus de la présente introduction et une conclusion. Le premier chapitre expose une revue de littérature incluant le résumé de quelques études antérieures en lien avec la problématique. Le chapitre deux porte sur le programme expérimental et les paramètres de l'étude considérés. Le chapitre trois présente les résultats des essais, leurs analyses et discussions. Le chapitre quatre traite des analyses

numériques sur l'effet des basses températures sur la réponse sismique des ponts isolés à la base par les systèmes d'isolations en élastomères. Finalement, les principales conclusions et recommandations de futurs travaux de recherche clôturent le mémoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

L'isolation sismique de la base constitue une technique de plus en plus populaire pour protéger les structures, particulièrement les ponts, lors des séismes. On distingue deux grandes familles d'isolateurs sismiques courants pour les ponts : 1) les isolateurs à base de glissement et ; 2) les isolateurs à base d'élastomère. Ces derniers sont typiquement composés d'une succession de couches d'élastomères et plaques en aciers minces liées entre elles par le processus de vulcanisation, avec ou sans artifice d'amortissement ajouté. Leurs comportements dépendent fortement des propriétés mécaniques de l'élastomère qui les compose. De ce fait, lors du développement d'un composé élastomère pour usage dans des isolateurs sismiques, il est important de s'assurer que les propriétés mécaniques et chimiques soient adéquates afin de pouvoir résister aux charges et aux conditions de l'environnement (température, ozone) et avoir un comportement souhaitable et prévisible.

Ce chapitre décrit sommairement les systèmes d'isolations à base d'interface de glissement. Ensuite, les systèmes à base d'élastomères sont vus plus en détail, en décrivant les types et les matériaux qui les composent ainsi que leurs propriétés mécaniques. Finalement, le chapitre présente une revue des études antérieures sur les principaux facteurs influant les propriétés mécaniques des élastomères et isolateurs/appuis en élastomères en mettant l'accent sur l'effet des basses températures.

1.1 Principe de l'isolation sismique de la base

L'isolation sismique de la base consiste à introduire des dispositifs flexibles latéralement entre une structure et sa fondation dans le but de découpler les mouvements horizontaux du sol des déplacements horizontaux de la structure, permettant ainsi de réduire les dommages causés pendant les séismes (Taylor & Igusa, 2004). Cette flexibilité introduite permet d'allonger la période naturelle de la structure et de l'éloigner des fréquences prédominantes d'un séisme, entraînant de ce fait une réduction des forces sismiques transmises à la structure

(Guizani, 2007). Cependant, l'accroissement de la période engendre généralement une augmentation de la réponse en termes de déplacement ce qui entraîne des inconvénients notamment la nécessité de prévoir un gap sismique plus important. De ce fait, l'ajout d'une composante permettant d'augmenter la capacité de dissipation d'énergie de la structure est très souvent requis afin de garder un compromis entre la réduction des forces sismiques et l'augmentation des déplacements. La Figure 1.1 montre les effets de l'isolation sismique de la base sur les forces et déplacements sismiques.

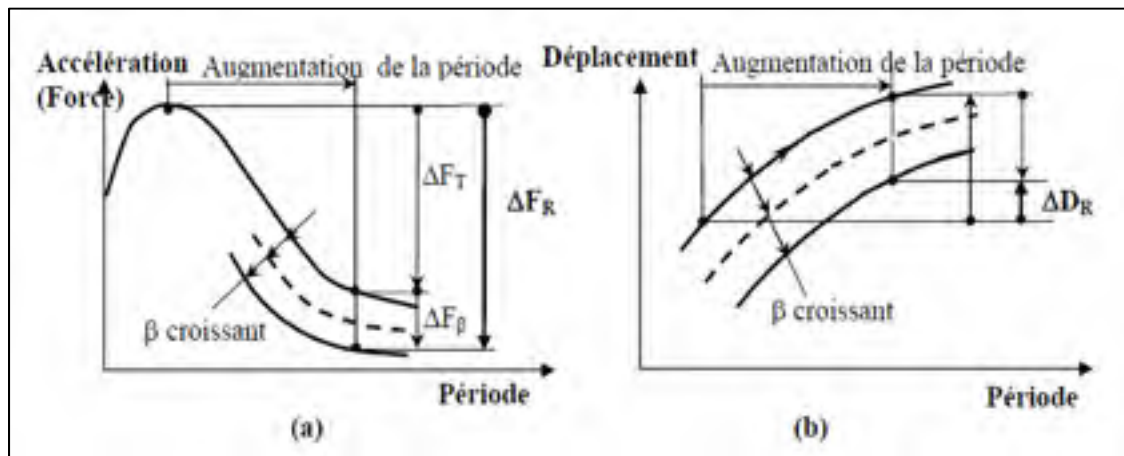


Figure 1.1 Effet de l'allongement de la période et augmentation de l'amortissement sur a) les forces sismiques ; b) les déplacements sismiques

Tirée de Guizani (2007)

Les principales caractéristiques des systèmes d'isolation sismique des ponts sont (Guizani, 2007) :

- un système d'appui capable de transmettre les charges verticales et latérales tout en fournissant une flexibilité horizontale afin d'allonger la période de vibration permettant ainsi de réduire les forces sismiques ;
- un mécanisme de dissipation d'énergie (amortisseurs sismiques) qui permet de contrôler les déformations de l'isolateur et de limiter les déplacements de la superstructure. Il permet également, le cas échéant, de réduire les forces sismiques ;

- un système de retenue qui permet de fournir une rigidité initiale adéquate face aux charges de services comme le vent.

1.2 Systèmes d'isolations sismiques de la base des ponts

Les systèmes d'isolations couramment utilisés pour les ponts peuvent être classés en deux catégories : les systèmes d'isolations à base de glissement et les systèmes d'isolations à base d'élastomère (Guizani, 2007). Dans la catégorie des systèmes à base de glissement, le système le plus courant est le pendule de friction. D'autres système tels que le Eradquake, basé sur un appui à disque et le Izolatech, basé sur un appui à élastomère confiné, sont également utilisés. Dans la famille des systèmes en élastomères, les trois types les plus utilisés sont les systèmes en élastomère fretté, les systèmes en élastomère fretté à amortissement élevé et les systèmes en élastomère fretté à noyau de plomb. Ces systèmes d'isolations sont décrits brièvement dans cette sous-section.

1.2.1 Système d'isolation à base de glissement

1.2.1.1 Pendule de friction

Le système de pendule de friction est composé essentiellement d'une surface concave sphérique en acier inoxydable sur laquelle glisse une tige articulée ayant la forme d'une lentille tel qu'indiqué à la figure 1.2 (Guizani, 2007). La surface de la tige est recouverte d'un matériau PTFE (polytétrafluoroéthylène), qui a une faible résistance au frottement, et est appelé communément du Téflon. Sous mouvement latéral, la tige glisse sur la surface concave permettant ainsi la dissipation d'énergie sismique par friction (frottement), et le poids propre de la structure agit comme une force de recentrage qui permet de faire revenir celle-ci à la position initiale (Buckle, Constantinou, Diceli, & Ghasemi, 2006). Le pendule de friction a également une grande résistance aux charges verticales, et peut être conçu pour avoir de grandes périodes de vibration (plus que 5,0 secondes) avec de grandes capacités de déplacement latéral (Buckle et al., 2006).

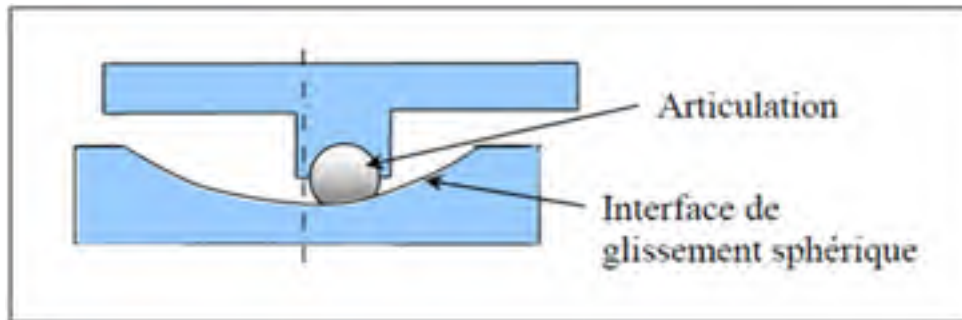


Figure 1.2 Système de pendule de friction
Tirée de Guizani (2007)

1.2.1.2 L'isolateur Eradiquake

L'isolateur Eradiquake a le même concept que le pendule de friction, à la différence que celui-ci a une surface de glissement de forme plane (Buckle et al., 2006). Il est composé de deux plaques formant l'interface de glissement, d'un disque pour accommoder les mouvements de rotation et des ressorts qui fournissent la force de recentrage après un déplacement. Il est généralement utilisé dans les zones à sismicités modérées. La Figure 1.3 montre le schéma typique de l'isolateur Eradiquake.

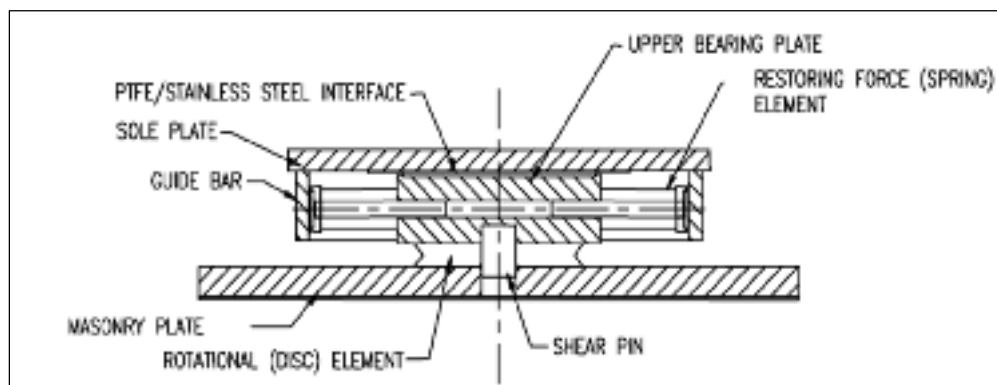


Figure 1.3 Isolateur Eradiquake
Tirée de Buckle et al. (2006)

1.2.1.3 L'isolateur Izolatech

L'isolateur Izolatech a été le premier système d'isolation sismique développé au Québec. Il a été développé par la compagnie Goodco Z-Tech du groupe Canam-ponts, en collaboration avec des partenaires canadiens (Guizani, 2007). Il est composé d'un appui en élastomère confiné muni d'une interface de glissement en acier inoxydable (Téflon) et d'un système de recentrage composé de ressorts en acier. L'interface de glissement permet la dissipation d'énergie et le système de recentrage offre une rigidité post-élastique à l'isolateur. La Figure 1.4 montre le schéma de l'isolateur Izolatech.

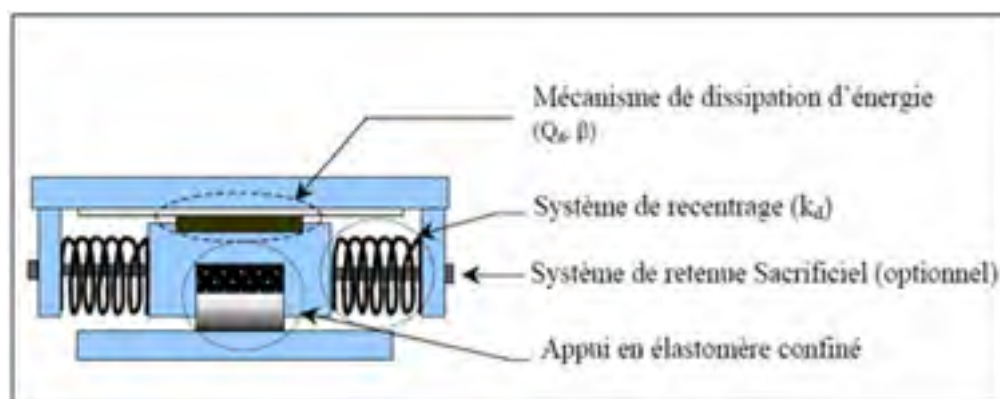


Figure 1.4 Schéma de l'isolateur Izolatech
Tirée de Guizani (2007)

1.2.2 Systèmes d'isolations à base d'élastomère

1.2.2.1 Isolateurs en élastomère fretté (RB)

Les isolateurs en élastomère fretté sont, généralement, fabriqués en forme circulaire ou rectangulaire. Ils sont constitués de plusieurs couches d'élastomère alternées par des plaques en acier minces appelées « frettes » (Taylor & Igusa, 2004). Les plaques d'acier offrent à l'élastomère un confinement lui permettant une résistance aux charges verticales, alors que la faible rigidité et la bonne capacité de l'élastomère en cisaillement permet de reprendre les forces latérales (horizontales) avec une flexibilité pouvant être contrôlée et ajustée pour

allonger la période. La Figure 1.5 montre le schéma typique d'un isolateur en élastomère fretté. L'élastomère généralement utilisé, pour ce type d'isolateur, est de faible taux d'amortissement. Par conséquent, d'autres dispositifs supplémentaires d'amortissement sont, généralement, utilisés en combinaison avec ce type d'isolateurs pour pallier à ce manque d'amortissement (Naeim & Kelly, 1999).

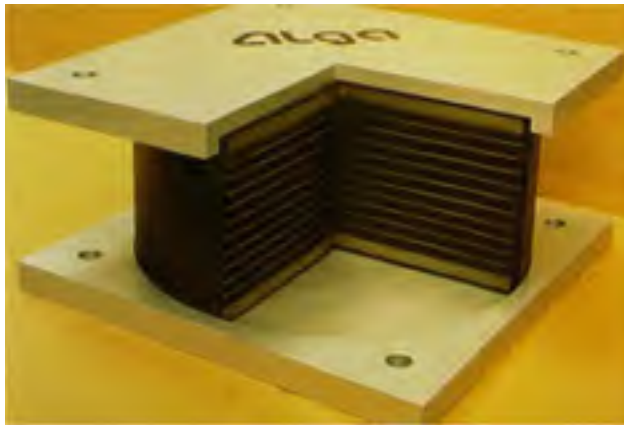


Figure 1.5 Schéma typique d'un isolateur en élastomère fretté
Tirée de Calvi et Kawashima (2007)

1.2.2.2 Isolateurs en élastomère fretté à amortissement élevé (HDRB)

Les isolateurs en élastomère à amortissement élevé ont une configuration identique aux isolateurs en élastomère fretté, à l'exception que l'élastomère employé possède une plus grande capacité d'amortissement, inhérente à son hystérésis. Ils permettent à la fois de réduire la demande sismique et de dissiper l'énergie induite par le séisme dans la structure, permettant ainsi d'éliminer le besoin d'amortissement supplémentaire (Calvi & Kawashima, 2007). Les HDRB ont une capacité d'amortissement variant de 8 à 16% de l'amortissement critique (Taylor & Igusa, 2004). L'augmentation de l'amortissement est due à des ajouts de matériaux spécifiques à la composition de l'élastomère, comme les charges de carbone noir, des huiles ou des résines (Naeim & Kelly, 1999). Pour des niveaux de déformation modérés en cisaillement, le HDRB présente typiquement une relation force-déplacement bilinéaire qui tend à se rigidifier lorsque la déformation est très grande, conduisant ainsi à une courbe de forme tri-linéaire comme le montre la figure 1.6 (Clark, Aiken, & Kelly, 1997).

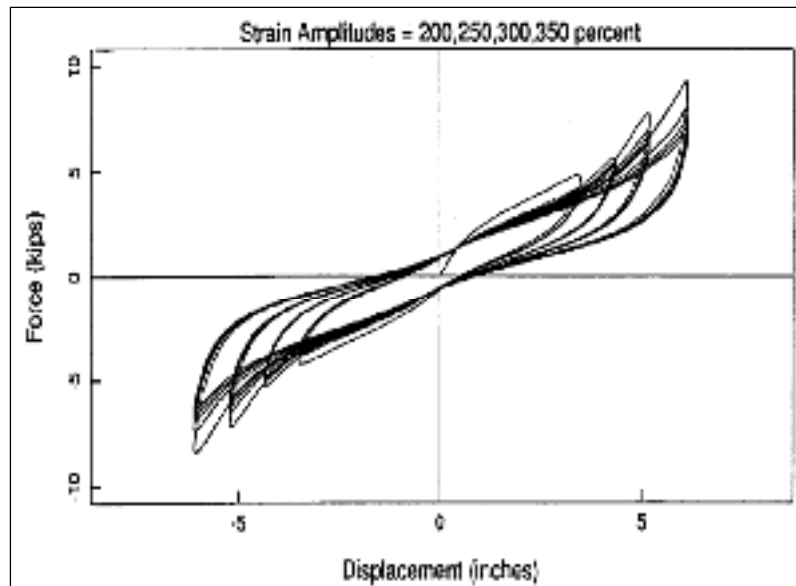


Figure 1.6 Courbe force-déplacement d'un isolateur en élastomère fretté à amortissement élevé
Tirée de Clark et al. (1997)

1.2.2.3 Isolateurs en élastomère fretté à noyau de plomb (LRB)

Le LRB a été inventé en avril 1975 par le Néo-Zélandais W. H. Robinson (Skinner, Robinson, & McVerry, 1993). Sa configuration est, essentiellement, similaire à celle d'un isolateur en élastomère fretté, à l'exception que le LRB contient un noyau en plomb au centre ayant la forme cylindrique, tel que montré par la figure 1.7. Le diamètre du noyau de plomb est, généralement, de l'ordre de 10 à 20% du diamètre total de l'isolateur (Calvi & Kawashima, 2007). Lorsque l'isolateur est soumis à des mouvements horizontaux, les plaques d'aciers forcent le noyau de plomb à se déformer latéralement. Celui-ci permet ainsi d'offrir une rigidité initiale en service comme sous la charge du vent et de fournir une grande capacité de dissipation d'énergie lors d'événements sismiques (Buckle et al., 2006). De ce fait, le LRB est habituellement construit avec des élastomères à faible taux d'amortissement.

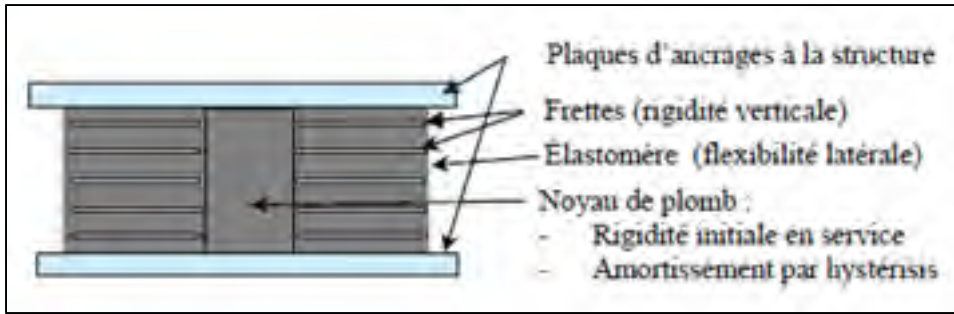


Figure 1.7 Schéma d'un isolateur en élastomère fretté à noyau de plomb
Tirée de Guizani (2007)

1.3 Modélisation des isolateurs à base d'élastomère

Le modèle bilinéaire montré à la figure 1.8 est, généralement, le modèle analytique le plus utilisé pour décrire le comportement des isolateurs en élastomères sous chargement horizontal. Dans cette figure, K_u représente la rigidité élastique, K_d la rigidité post-élastique, Q_d la résistance caractéristique, F_y la force correspondant au déplacement élastique limite Δ_y et F_{max} la force correspondant au déplacement maximal de l'isolateur Δ_{max} . Les paramètres qui décrivent ce modèle sont déterminés à partir des équations suivantes (Naeim & Kelly, 1999) :

La rigidité effective (K_{eff}) de la courbe force-déplacement est donnée par la formule suivante :

$$K_{eff} = K_d + \frac{Q_d}{\Delta_{max}} \quad (1.1)$$

Le déplacement correspondant à la limite élastique est calculé par la formule suivante :

$$\Delta_y = \frac{Q_d}{K_u - K_d} \quad (1.2)$$

L'énergie dissipée par cycle (EDC) est égale à l'aire de la relation force-déplacement, et est exprimée par la formule suivante :

$$EDC = 4Q_d(\Delta_{max} - \Delta_y) \quad (1.3)$$

Le taux d'amortissement visqueux équivalent est défini par la relation suivante :

$$\xi_{eq} = \frac{EDC}{2\pi K_{eff} \Delta_{max}^2} \quad (1.4)$$

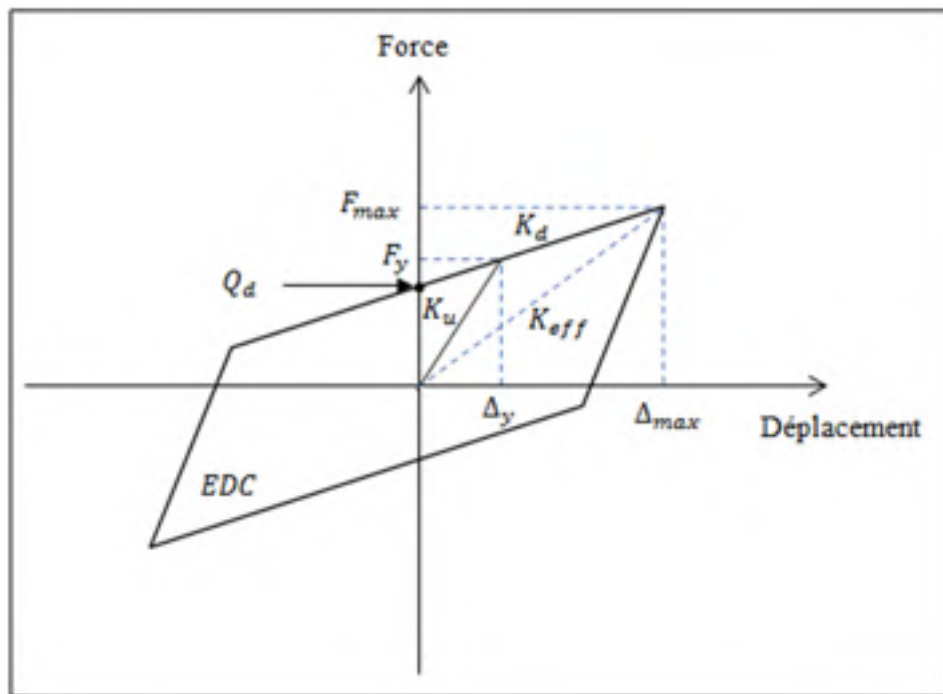


Figure 1.8 Modèle analytique bilinéaire pour isolateurs à base d'élastomères

Pour des fins de conception de systèmes d'isolations sismiques, ce modèle est caractérisé principalement par deux paramètres, qui sont la résistance caractéristique (Q_d) et la rigidité post-élastique (K_d) des isolateurs. Pour les isolateurs en élastomères frettés à amortissement élevé, Q_d et K_d sont fonction des propriétés de l'élastomère, et peuvent donc être déterminés expérimentalement à partir des données de la courbe d'hystérésis force-déplacement.

Dans le cas des isolateurs en élastomère à noyau de plomb, ces paramètres sont fonction à la fois des propriétés de l'élastomère et du noyau de plomb constituant l'isolateur. Comme les LRB sont souvent construits avec des élastomères à faible taux d'amortissement, donc la résistance caractéristique, Q_d , est déterminée essentiellement à partir des propriétés du noyau de plomb, et est donnée par (Buckle et al., 2006) :

$$Q_d = \sigma_{yL} * A_L \quad (1.5)$$

Où, σ_{yL} représente la limite élastique du plomb et A_L est l'aire du noyau de plomb.

Quant à la rigidité post-élastique (K_d), elle est fonction des propriétés de l'élastomère, et est donnée par :

$$K_d = \frac{G_r A_r}{T_r} f \quad (1.6)$$

Où, G_r est le module de cisaillement de l'élastomère, A_r est la section transversale de l'élastomère, T_r est l'épaisseur totale de l'élastomère et f est un facteur qui tient compte de la contribution du noyau de plomb dans la rigidité post-élastique. Il est, en général, pris égale à 1,1 (Buckle et al., 2006).

Il est à noter que pour les LRB, la contrainte limite élastique (σ_{yL}) du noyau de plomb dépend fortement de la température interne initiale de l'isolateur. Ensuite, lorsque l'isolateur est soumis à un chargement cyclique en cisaillement, la température du noyau de plomb augmente de manière significative conduisant ainsi à des changements dans la valeur de σ_{yL} , et par conséquent de la valeur de la résistance caractéristique (Q_d) (Kalpakidis & Constantinou, 2008; Maret, 2016).

1.4 Matériaux composants les isolateurs à base d'élastomère fretté

1.4.1 Le caoutchouc

Les élastomères provenant d'une origine naturelle ou synthétique, sont des polymères amorphes pour lesquels sont rajoutés plusieurs composants chimiques tels que des huiles, antioxydants, accélérateurs, agents vulcanisant, retardateurs, etc. (Gent, 2012). Après malaxage et vulcanisation, le matériau devient du « caoutchouc » (Gent, 2012). La vulcanisation est un procédé chimique qui consiste à créer des liaisons entre les longues chaînes macromoléculaires du caoutchouc, en ajoutant un agent vulcanisant tel que le soufre et les peroxydes et l'application de la chaleur. Des charges, le plus souvent du noir de carbone, sont aussi ajoutées aux caoutchoucs afin d'augmenter leurs caractéristiques mécaniques tels que le module d'élasticité, le module de cisaillement et l'élongation à la rupture (Calvi & Kawashima, 2007). Ces charges permettent, également, d'accroître leurs capacités de dissipation d'énergie par hystérésis. Dans le cas des applications en isolation sismique, le caoutchouc naturel et le néoprène sont, généralement, les plus employés.

1.4.1.1 Le caoutchouc naturel

La matière première du caoutchouc naturel (NR) est obtenue à partir du latex d'un arbre originaire de l'Amérique du Sud appelé l'Hévéa (Ciesielski, 1999). Chimiquement, le NR est composé du monomère isoprène de formule chimique (C_5H_8) qui se répète n fois pour obtenir le polymère polyisoprène, n représente une valeur d'environ 20000, et C_5H_8 est le monomère isoprène (Morton, 2013). Le processus par lequel les molécules se rejoignent pour créer de longues chaînes macromoléculaires est appelé la polymérisation tel que montré par la figure 1.9 (Morton, 2013). Le NR se caractérise par une grande élasticité et un faible hystérésis à faible amplitude de déformation (Harrabi, 2009). Il a aussi une faible résistance face aux attaques de l'environnement comme l'oxygène et l'ozone.

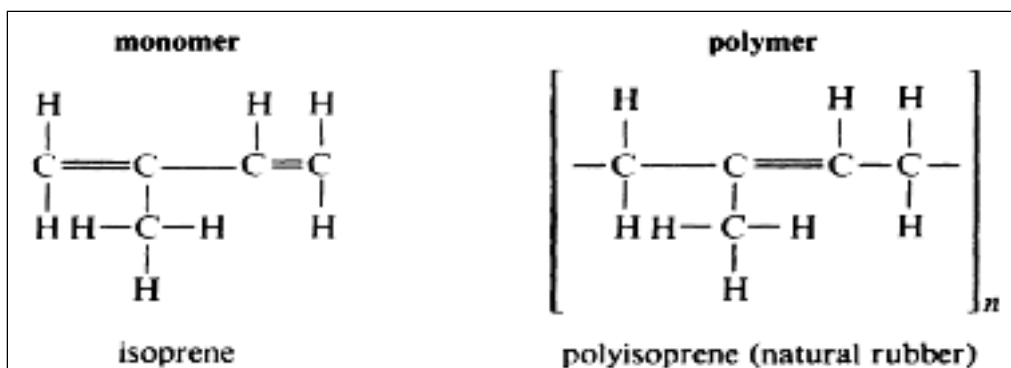


Figure 1.9 Polymérisation du polyisoprène
Tirée de Morton (2013)

1.4.1.2 Le néoprène

Découvert par Arnold Collins, le polychloroprène, communément appelé le néoprène (CR) par son nom commercial, est l'un des premiers caoutchoucs synthétiques issus de la recherche (Harrabi, 2009). Sa matière première provient des produits pétroliers (Ciesielski, 1999). Il est obtenu par polymérisation du monomère chloroprène pour former le polychloroprène tel que montré par la figure 1.10 (Morton, 2013). Le néoprène possède une grande résistance à la dégradation face aux attaques environnementales comme l'ozone et l'oxygène (Treloar, 1975).

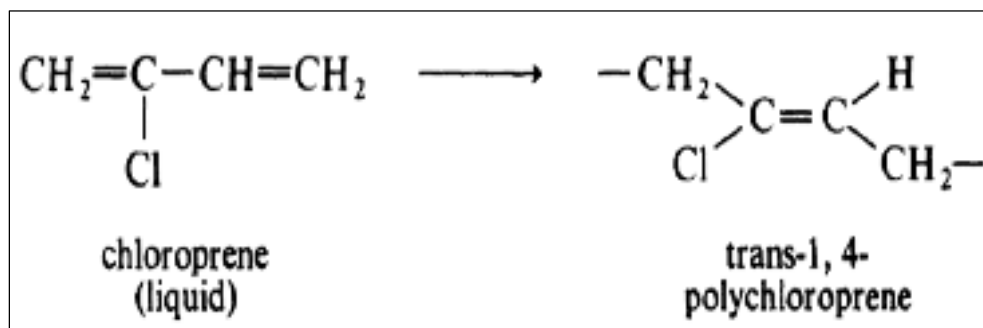


Figure 1.10 Polymérisation du polychloroprène
Tirée de Morton (2013)

1.4.1.3 Propriétés mécaniques du caoutchouc

Les élastomères sont caractérisés par des propriétés matérielles mécaniques qui les rendent attrayants en isolation sismique. Ils ont de faibles modules d'élasticité et de cisaillement et un grand module de compressibilité ainsi qu'une grande élongation à la rupture (Clark et al., 1997). Ceci leur permet de supporter les charges verticales provenant du poids de la superstructure et en même temps permettre les mouvements horizontaux par leur flexibilité latérale. Quelques propriétés des élastomères sont données dans ce qui suit.

La dureté

Dans des applications typiques en industrie, la dureté constitue l'une des caractéristiques les plus utilisées pour classer les caoutchoucs (Gent, 2012). Car, celle-ci est facilement mesurable par des tests et peut être corrélée par des formulations mathématiques avec d'autres propriétés telles que le module de compression et le module de cisaillement (Taylor, Lin, & Martin, 1992). La dureté est décrite comme étant la résistance à la pénétration d'un poinçon (pénétrateur) sous certaines conditions prescrites (Gent, 2011). Deux normes standardisées sont généralement les plus utilisées pour déterminer la dureté d'un caoutchouc. Ce sont le degré international de dureté du caoutchouc (IRHD) et la dureté au Duromètre. Dans le test au Duromètre, l'échelle Shore A est la plus utilisée pour les caoutchoucs et varie de 0 (très doux) à 100 (très dur) (Arditzoglou, Yura, & Haines, 1995). Pour les isolateurs en élastomère, le code canadien des ponts routiers (CSA, 2014a) spécifie que le caoutchouc doit avoir une dureté de 55 Shore A avec une tolérance de ± 5 .

Module d'élasticité

En traction, le caoutchouc a un comportement fortement non linéaire et ne suit pas la loi de Hooke (Ciesielski, 1999). Il est donc difficile de déterminer son module d'élasticité de manière définitive. Cependant, dans le domaine des petites déformations, sa courbe contrainte-déformation est quasi linéaire, donc le module d'élasticité peut être quantifié de

façon assez précise. Toutefois, le module d'élasticité varie en fonction de la température et de la vitesse de déformation, de sorte qu'il augmente avec la diminution de la température et avec l'augmentation de la vitesse de déformation (Ciesielski, 1999). La Figure 1.11 montre la courbe contrainte-déformation d'un essai de traction uni-axiale pour un caoutchouc naturel de dureté 50 Shore A, réalisé à une température de 20°C.

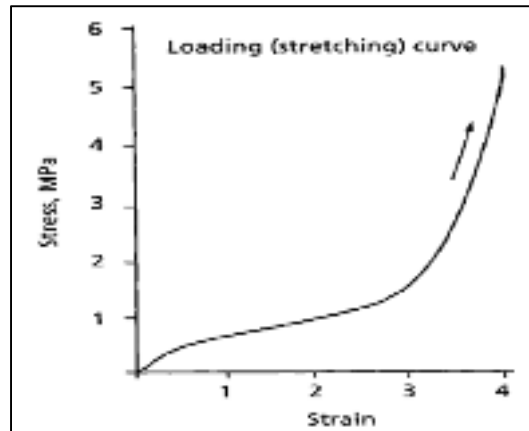


Figure 1.11 Loi contrainte-déformation d'un caoutchouc naturel en traction
Tiré de Ciesielski (1999)

Module de compressibilité

Selon Gent (2012), le module de compressibilité mesure la résistance d'un caoutchouc à s'opposer au changement de volume quand il est soumis à une pression hydrostatique (P), tel qu'illustré à la figure 1.12. Les élastomères présentent des modules de compressibilité très élevés variant de 1000 à 2000 MPa. Le module de compressibilité d'un caoutchouc (K) est donné par la formule suivante :

$$K = \frac{P}{\Delta V/V_0} \quad (1.7)$$

Où, V_0 est le volume initial de l'élastomère et ΔV est la diminution de volume.

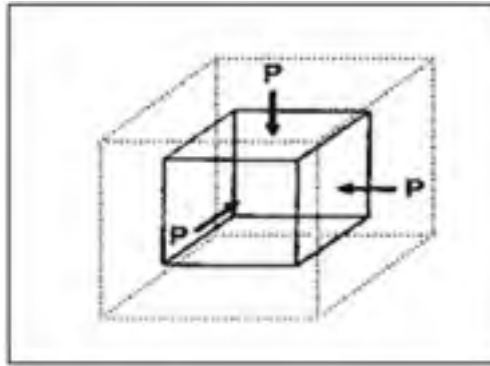


Figure 1.12 Compressibilité du caoutchouc
Tirée de Gent (2012)

Module de cisaillement

En isolation sismique, le module de cisaillement est une propriété importante qui caractérise la rigidité latérale des isolateurs en élastomères (Yura et al., 2001). Il peut être déterminé en conduisant des tests sur des isolateurs à pleine échelle ou à échelle réduite, sur des petits blocs d'élastomères coupés de l'isolateur et collés sur des plaques en aciers par vulcanisation (Yura et al., 2001). Dans l'essai à pleine échelle, on peut procéder de la manière suivante : deux isolateurs identiques sont assemblés entre trois plaques et une force de compression constante, est appliquée sur les plaques supérieure et inférieure tel que montré par la figure 1.13. Une force horizontale en cisaillement est ensuite exercée sur la plaque centrale jusqu'à une déformation donnée. Le module de cisaillement (G_r) est alors déterminé à partir de la relation contrainte-déformation obtenue, par la formule suivante :

$$G_r = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.8)$$

Où, τ est la contrainte de cisaillement et γ est la déformation en cisaillement.

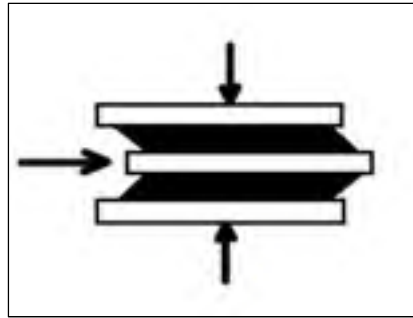


Figure 1.13 Essai pleine échelle pour déterminer le module de cisaillement
Tirée de Yura et al. (2001)

Dans le test à échelle réduite, le module de cisaillement est déterminé selon la procédure du standard (ASTM D4014, 2007). Le spécimen est un Quad-Shear standard où quatre blocs d'élastomères ayant les mêmes dimensions sont collés à des plaques en acier par vulcanisation, comme montré à la figure 1.14. Les plaques d'acier au centre sont soumises à des forces de traction uni-axiale déformant ainsi les blocs d'élastomères en cisaillement. Six cycles de chargement sont appliqués jusqu'à une déformation égale à l'épaisseur moyenne des blocs de caoutchoucs. La valeur du module de cisaillement est, ensuite, déterminée à partir de la courbe contrainte-déformation en cisaillement correspondant au sixième cycle de charge.



Figure 1.14 Spécimen Quad-Shear standard
Tirée de Yura et al. (2001)

Arditzoglou et al. (1995) ont étudié l'effet de la charge de compression sur le module de cisaillement dans le cas de tests à échelle réduite. Deux types d'essais ont été conduits sur des spécimens Quad-Shear standard. Le premier est un essai en cisaillement simple et le deuxième est un essai combiné en compression et cisaillement. Les deux essais suivaient la même procédure décrite dans ASTM D4014 (2007), à la différence que pour l'essai combiné

de compression et cisaillement, avant l'application du chargement cyclique en cisaillement, une force de compression constante est appliquée sur le spécimen par un système de boulonnage. La figure 1.15 montre les configurations des deux essais (a) cisaillement simple (b) essai combiné en compression et cisaillement. Les contraintes de compression utilisées dans l'essai (b) sont de 0,83 MPa et 1,52 MPa. Les résultats montrent que les essais combinés en compression et cisaillement donnent des valeurs du module de cisaillement environ 3% plus élevées que celles obtenues avec les essais en cisaillement simple. Ce qui indique que l'effet de la charge de compression est négligeable.

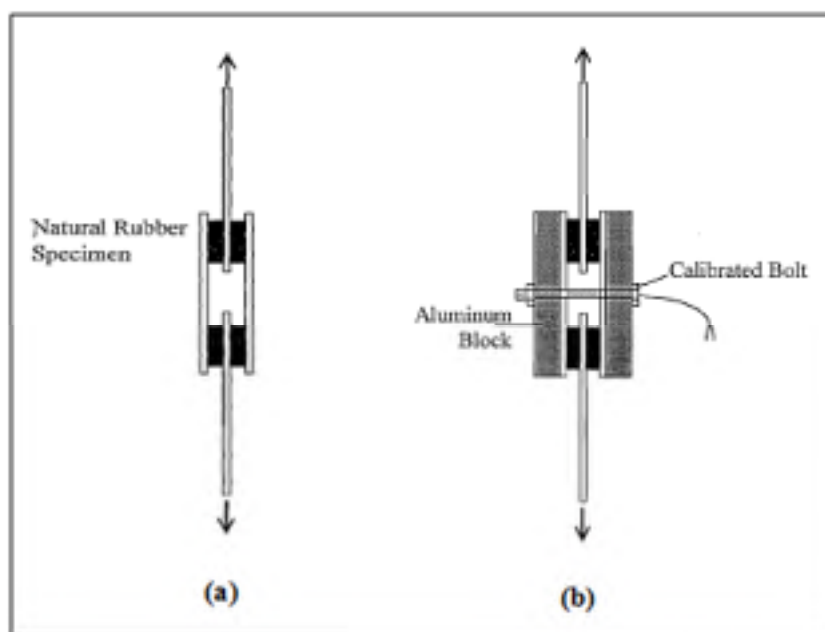


Figure 1.15 Configuration des essais (a) cisaillement simple (b) combiné en compression et cisaillement
Tirée de Arditoglou et al. (1995)

Résistance à la traction

La résistance à la traction est la contrainte maximale que peut supporter un échantillon de caoutchouc tiré jusqu'à rupture (Ciesielski, 1999). Elle dépend principalement de la composition du caoutchouc notamment du type des charges de renforcement et du processus de vulcanisation (Ciesielski, 1999). Le code canadien des pont routiers (CSA, 2014a) exige

une résistance minimale en traction des 17,0 MPa pour les élastomères utilisés dans la construction d'isolateurs sismiques.

Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture d'un caoutchouc dépend de sa composition chimique et de sa rigidité (Ciesielski, 1999). Le caoutchouc naturel possède un allongement à la rupture plus élevé que le néoprène (Buckle et al., 2006). Généralement, pour une même valeur de degré de dureté, le caoutchouc naturel produit des allongements à la rupture supérieurs au néoprène (Stanton & Roeder, 1982). Toutefois, des allongements allant jusqu'à 600% peuvent être atteints pour les deux types d'élastomères. Le code canadien des ponts routiers (CSA, 2014a) exige que l'élastomère utilisé dans les isolateurs sismiques ait au minimum un allongement à la rupture de 400%.

1.4.2 Le plomb

Le plomb est un matériau largement utilisé dans la fabrication de dispositifs de protection sismique de structures tels que les amortisseurs à base de plomb et les LRB (Guruswamy, 1999). Sa malléabilité et son excellente capacité d'amortissement font de lui un matériau très attrayant en isolation sismique des structures de génie civil. Le plomb utilisé dans les amortisseurs à base de plomb et les LRB est d'une pureté élevée dépassant les 99,9%, en raison que ces propriétés sont très influencées par la présence d'impuretés comme sa résistance à la traction (Guruswamy, 1999; Kalpakidis & Constantinou, 2008). Le plomb présente également de grandes déformations dans le domaine plastique et a une capacité de se recristalliser quand il est déformé.

Le plomb pur est un matériau très ductile à température ambiante, et cela provient principalement de son réseau cristallin qui est cubique face centrée (CFC) et de sa faible température de fusion (T_M) qui est de 327,3°C (Guruswamy, 1999). Il possède une loi de comportement force-déplacement latéral quasi élasto-plastique parfaite, avec une contrainte

limite élastique en cisaillement d'environ 10 MPa (Skinner et al., 1993). Il a aussi de bonnes propriétés à la fatigue sous charges répétées et des propriétés mécaniques relativement stables à température ambiante.

1.4.3 Les plaques d'acier

Les plaques en aciers insérées dans les isolateurs en élastomère ont pour fonctions d'augmenter la résistance aux charges verticales et d'améliorer la stabilité de l'isolateur sous charges latérales (Priestley, Seible, & Calvi, 1996). En effet, sous contrainte de compression, l'élastomère a tendance à se déformer latéralement (en anglais « *bulging* ») parce que celui-ci est un matériau quasi incompressible. Les plaques retiennent donc l'élastomère en appliquant sur lui des contraintes de cisaillements et augmentent ainsi la rigidité verticale de l'isolateur (Priestley et al., 1996). Le code canadien des ponts routiers (CSA, 2014a) stipule que ces lamelles d'aciers utilisés dans la construction des isolateurs sismiques soient des tôles en acier doux ayant contrainte élastique limite minimale de 230 MPa.

1.5 Facteurs influençant les propriétés des isolateurs à base d'élastomère

Les propriétés des isolateurs en élastomères sont influencées par plusieurs facteurs qui ont ainsi un impact significatif sur leur comportement sismique. Principalement ces facteurs sont regroupés en le vieillissement, le scragging et recouvrement et l'effet de la température particulièrement les basses températures. Ces facteurs sont traités dans ce qui suit.

1.5.1 Le vieillissement

Le vieillissement est un phénomène qui produit des variations dans les propriétés mécaniques des élastomères au fil du temps (Clark et al., 1997; Morgan, Whittaker, & Thompson, 2001). Ces variations peuvent conduire au raidissement du matériau causé par la poursuite du processus de vulcanisation, et à des dégradations de l'élastomère dues aux effets de l'environnement tels que l'exposition à l'ozone et à l'oxygène. L'attaque à l'ozone survient plus dans les zones où le caoutchouc est soumis aux contraintes de traction (Yura et al.,

2001). Des fissures se développent perpendiculairement à la contrainte de traction provoquant ainsi une réduction de la résistance à la traction et la durabilité du matériau. Le néoprène est connu plus résistant à ces effets par rapport au caoutchouc naturel (Yura et al., 2001). Toutefois, ces attaques environnementales peuvent être réduites par l'application de la cire ou l'incorporation d'agents chimiques antis dégradants comme les antioxydants.

Morgan et al. (2001), ont conduit des essais sur des isolateurs en élastomère à amortissement élevé (HDRB) qui ont été déjà testés cinq (5) ans auparavant avec le même protocole d'essai. Les résultats indiquaient des augmentations du module de cisaillement effectif des isolateurs variant de 10 à 32%.

1.5.2 Le scragging et recouvrement

Les composés élastomères à amortissements élevés (HDNR) sont caractérisés par des réductions dans les niveaux de contraintes durant le premier cycle de chargement par rapport aux cycles qui suivent quand testés pour la première fois (Morgan et al., 2001; Thompson, Whittaker, Fenves, & Mahin, 2000). Ce phénomène est connu sous le nom du « scragging ». Ainsi, pour un composé élastomère vierge, les propriétés déterminées au premier cycle sont nommées « unscragged », tandis que celles calculées aux cycles suivants sont nommés « scragged ». Par conséquent, afin d'éliminer l'effet du scragging, l'élastomère est pré-déformé avant de le tester, c'est-à-dire qu'il est soumis à des cycles de chargement en cisaillement à une amplitude donnée avant sa mise à l'essai (Morgan et al., 2001). Cependant, des études expérimentales (Kulak, 1999; Morgan et al., 2001; Thompson et al., 2000) ont montré qu'un recouvrement des propriétés vierges (initiales) de l'élastomère survient après un certain temps de repos. Ce recouvrement dépend essentiellement de la formulation de l'élastomère, du processus de vulcanisation utilisé durant fabrication de l'élastomère et des déformations antérieures subies par l'élastomère. Kulak (1999), a évalué expérimentalement le comportement au recouvrement d'un élastomère HDNR sous chargement cyclique en cisaillement. Il a conclu que l'élastomère recouvre ses propriétés initiales, et qu'il n'est pas important de pré-déformer les isolateurs en élastomères avant leur installation. Thompson et

al. (2000) ont rapporté les résultats d'une étude expérimentale, caractérisant les effets du scragging et recouvrement des isolateurs en élastomères à haut taux d'amortissement, conduite à l'université de Californie à Berkeley. Les résultats indiquaient que 100% de recouvrement a été observé après 5 ans de repos pour les isolateurs en élastomères à haut amortissement et module de cisaillement élevé, et plus de 65% de recouvrement a été observé après 12 mois de repos pour les isolateurs en élastomères à haut amortissement et faible module de cisaillement. D'autres résultats d'isolateurs en élastomères à amortissement élevé et faible module de cisaillement indiquaient un recouvrement d'environ 60% après un mois de repos.

1.5.3 Effet des basses températures

Quand un élastomère est exposé à de basses températures, il devient plus rigide. Cette rigidification se produit principalement en deux phases (Constantinou et al., 2007; Roeder et al., 1990; Yakut & Yura, 2002). La première phase est le raidissement thermique instantané, la suivante est la cristallisation à basse température. La Figure 1.16 montre l'évolution de la rigidité des élastomères en fonction du temps d'exposition à de basses températures. Dans cette figure, le temps t_1 représente le raidissement thermique instantané qui caractérise l'atteinte de l'équilibre thermique dans un bloc d'élastomère. Entre t_1 et t_2 , la rigidité de l'élastomère reste pratiquement inchangée. Cette période dite « période d'induction », dépend essentiellement de la température et de la composition chimique de l'élastomère (la période d'induction est définie plus loin). Après le temps t_2 , une augmentation de la rigidité avec le temps d'exposition est observée laquelle est due à la cristallisation de l'élastomère.

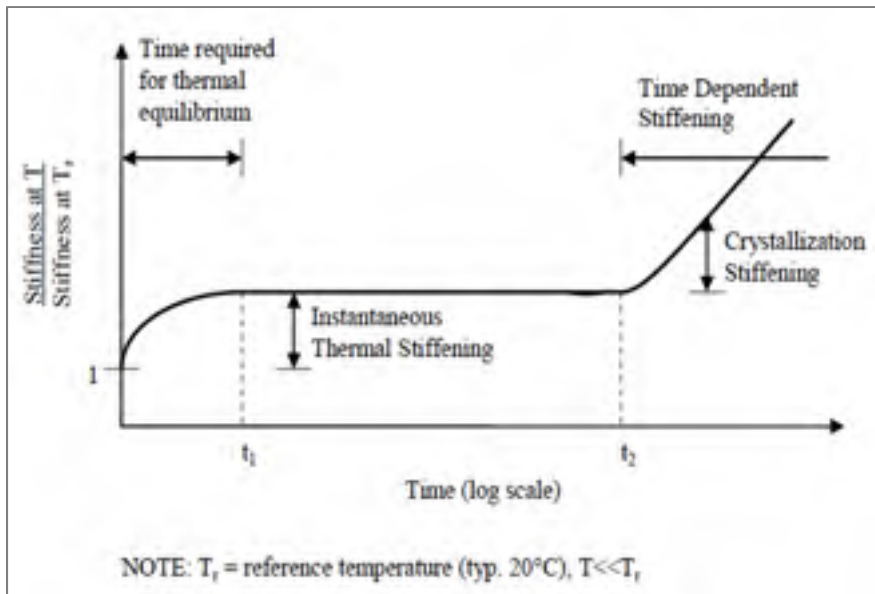


Figure 1.16 Comportement d'élastomère sous basses températures
Tirée de Constantinou et al. (2007)

1.5.3.1 Raidissement thermique instantané

Le raidissement thermique instantané est une augmentation rapide de la rigidité de l'élastomère sous basse température. Il se produit dans un intervalle de temps nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique, c'est-à-dire que la température au centre d'un bloc d'élastomère est égale à celle de l'air qui l'entoure. Ce temps dépend fortement de la température et de l'épaisseur du bloc de l'élastomère (Constantinou et al., 2007). Plus la température est basse, plus le raidissement est important. Si la température baisse jusqu'à une température caractéristique, dite la température de transition vitreuse, l'élastomère change d'état et devient vitreux et fragile/cassant (Yura et al., 2001). Pour le caoutchouc naturel, cet état survient à environ -60°C , tandis que le néoprène atteint cette transition autour de -50°C (Roeder et al., 1990).

1.5.3.2 Cristallisation à basse température

La cristallisation survient quand l'élastomère est soumis aux basses températures pour de longues durées, c'est-à-dire après que le raidissement thermique instantané soit atteint

(Constantinou et al., 2007). Elle correspond à une augmentation graduelle de la rigidité qui varie notamment en fonction de la température et du temps d'exposition à celle-ci ainsi que du type et de la composition chimique de l'élastomère. Le caoutchouc naturel est réputé se cristalliser plus rapidement à une température proche de -25°C , tandis que pour le néoprène cette température de vitesse de cristallisation maximale est autour de -10°C . La cristallisation se produit à des vitesses modérées au-dessus et au-dessous de ces températures, respectivement, pour chacun des deux types d'élastomères (Yura et al., 2001). Toutefois, ce phénomène est complètement réversible et disparaît avec l'augmentation de la température. La température de fusion des cristallites dépend de la température à laquelle la cristallisation a eu lieu. Pour une cristallisation se produisant à 0°C , la fusion des cristallites commence à environ 6°C et s'achève à 16°C (Treloar, 1975).

Plusieurs recherches ont été effectuées afin d'étudier la cinématique de la cristallisation des élastomères à basse température (Fuller, Gough, & Thomas, 2004; Russell, 1951; Stevenson, 1983). Ces études ont montré que la cristallisation correspond à un réarrangement dans la structure moléculaire de l'élastomère, qui s'accompagne d'une augmentation graduelle de la densité et d'une diminution de volume. Pour le caoutchouc naturel, la diminution de volume est moins que 3%. La Figure 1.17 montre la structure moléculaire d'un élastomère partiellement cristallisé. Le mécanisme de cristallisation comprend l'étape de nucléation (germination) qui peut être définie comme l'alignement des chaînes moléculaires et la croissance des nuclei (germes) pour donner des cristallites. Le temps nécessaire à la nucléation est identifié par la « période d'induction », après laquelle des changements dans les propriétés de l'élastomère surviennent, tels que le module d'élasticité, la dureté, etc. (Stevenson, 1983). Sur la base d'essais, Stevenson (1983) a conclu que cette période dépend fortement de la température de l'essai et de la composition chimique de l'élastomère, et que pour le caoutchouc naturel cette période est minimale à la température de -25°C . La Figure 1.18 montre la vitesse de cristallisation d'un caoutchouc naturel en fonction de la température d'exposition. Fuller, Gough, Pond, et Ahmadi (1997); Fuller et al. (2004) ont démontré par des essais que l'ajout d'autres polymères (Vinyle-Butadiène) au caoutchouc naturel à amortissement élevé (HDNR) peut rallonger la période d'induction et retarder, ainsi la

survenue de la cristallisation. En contrepartie, dans ce cas, le raidissement thermique instantané est augmenté considérablement.

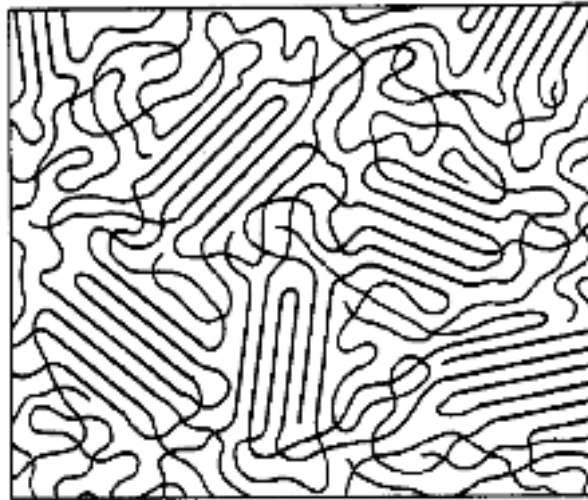


Figure 1.17 Structure moléculaire d'un élastomère partiellement cristallisé
Tirée de Treloar (1975)

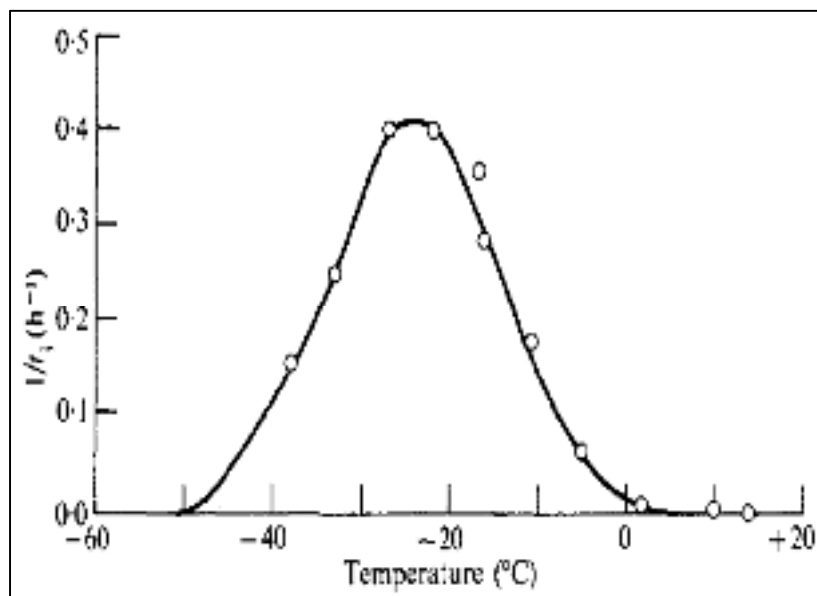


Figure 1.18 Variation de la vitesse de cristallisation du caoutchouc naturel en fonction de la température
Tirée de Treloar (1975)

1.5.3.3 Brève revue de quelques recherches expérimentales antérieures

Roeder et al. (1999)

Roeder et al. (1990) ont réalisé des études expérimentales pour évaluer les effets des basses températures sur le comportement du caoutchouc naturel et le néoprène. Les spécimens testés étaient des Quad-Shear de dimensions en plan 100 mm x 100 mm. Ils ont été soumis à des températures variant de -10°C à -50°C pour des périodes de conditionnement comprises entre 1 et 24 jours. Les tests ont été effectués sous chargement cyclique latéral en cisaillement à déformation maximale de $\pm 25\%$ et une fréquence de 0,01 Hz. Les résultats obtenus ont été présentés en termes de variation de la rigidité en cisaillement normalisée, mesurée à une déformation de 25%, en fonction du temps d'exposition aux basses températures. La rigidité en cisaillement normalisée à une basse température est définie comme le rapport entre les rigidités en cisaillement à température du test et celle à température pièce. Les Figures 1.19(a) et 1.19(b) montrent la variation de la rigidité en cisaillement normalisée pour le néoprène et le caoutchouc naturel respectivement, en fonction de la durée d'exposition et de la basse température. Les résultats de la figure 1.19(a) indiquent une augmentation de la rigidité dans les premières 24 heures qui est due au raidissement thermique instantané, sauf à température de -50°C pour laquelle l'élastomère a connu une transition vitreuse. Ensuite, une phase plus ou moins stable de la rigidité normalisée est observée pour quelques heures. Et finalement, une augmentation de la rigidité survient à nouveau avec des valeurs plus importantes et plus rapides pour des températures plus basses qui sont dues à la cristallisation de l'élastomère.

La Figure 1.19(b) montre la variation de la rigidité en cisaillement normalisée en fonction du temps d'exposition aux basses températures du caoutchouc naturel. Les résultats montrent des raidissements thermiques instantanés après 24 heures d'exposition. Quant au raidissement par cristallisation, les résultats montrent qu'il se produisait moins rapidement et à des niveaux plus faibles en comparaison avec le néoprène. La température à laquelle le taux

de cristallisation est élevé est -30°C . Il a été remarqué également que le caoutchouc naturel ne semblait pas atteindre la phase de transition vitreuse à -50°C .

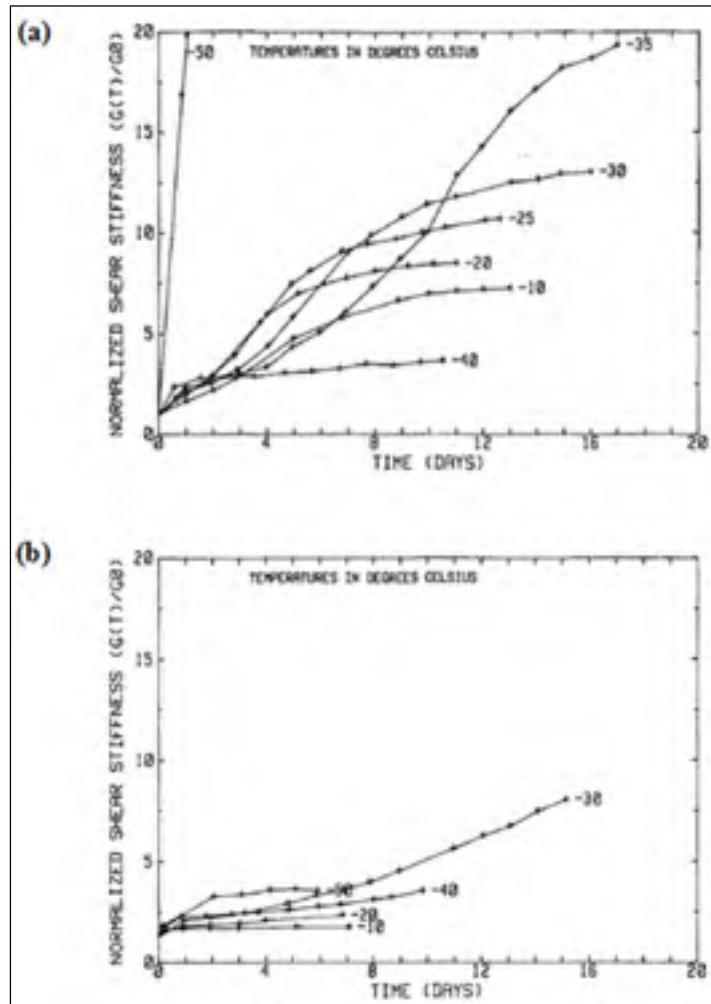


Figure 1.19 Variation de la rigidité en cisaillement normalisée avec le temps d'exposition à différentes températures (a) néoprène et (b) caoutchouc naturel
Tirée de Roeder et al. (1990)

Des essais supplémentaires ont été effectués par Roeder et al. (1990) sur le néoprène en variant la température d'exposition. La Figure 1.20 montre la variation de la rigidité normalisée du néoprène, soumis à des températures de -10°C pendant 12 jours, -30°C pendant 4 jours, -10°C pendant 2 jours et finalement à -30°C pour le dernier jour. La Figure 1.20 présente également la variation de la rigidité normalisée du même élastomère sous

température d'exposition constante de -30°C . Les résultats des deux tests semblent avoir des tendances de rigidification qui se rapprochent quand les températures d'exposition sont égales. La courbe du spécimen soumis à température variable paraît avoir une extrapolation logique avec celle du spécimen soumis à température constante quand la température descend de -10°C à -30°C . En effet, on peut constater que la rigidité normalisée du spécimen diminue lorsque sa température d'exposition remonte de -30°C à -10°C . Cependant, lorsque la température redescend de -10°C à -30°C , la rigidité du spécimen remonte rapidement pour rejoindre pratiquement celle du spécimen maintenu à -30°C au bout d'une journée. Les résultats indiquent aussi que la cristallisation diminue rapidement quand la température est remontée de -30°C à -10°C pour rejoindre la courbe de cristallisation de la température de -10°C au bout d'une journée.

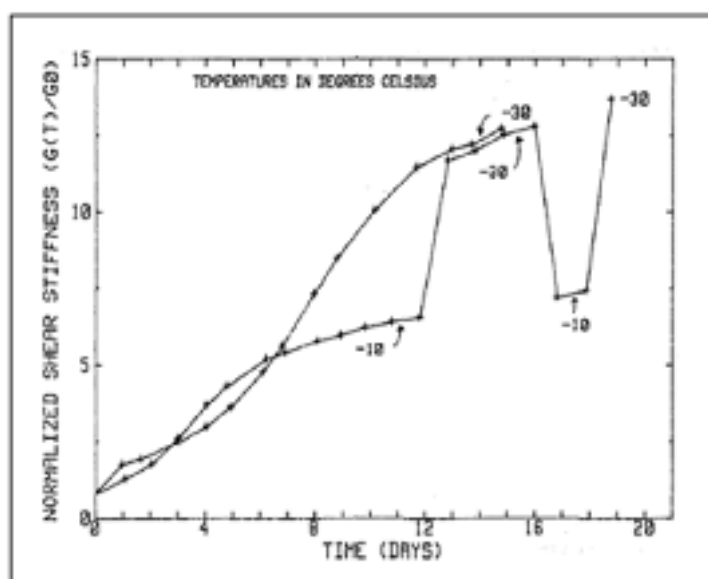


Figure 1.20 Effet de la variation de température sur la rigidité en cisaillement normalisée du néoprène
Tirée de Roeder et al. (1990)

Kim, Mander et Chen (199)

Kim, Mander, et Chen (1996) ont effectué une étude expérimentale afin d'étudier les performances sismiques d'un isolateur en élastomère freiné (RB) et un isolateur en élastomère

à noyau de plomb (LRB) sous basses températures. Les isolateurs avaient les dimensions en plan de 330 x 330 mm² et une hauteur de 225 mm, avec un diamètre du plomb de 63,5 mm pour le LRB. Le RB a été refroidi à -48°C et le LRB à -32°C et ont été maintenus à ces températures pendant quelques jours afin de s'assurer que le centre des isolateurs ait atteint les températures cibles. Le RB a été soumis à un chargement cyclique sinusoïdal complètement inversé de fréquence 0,1 Hz à une déformation constante de 50%, sous une force axiale constante de 356 kN. Tandis que le LRB a été soumis au même type de chargement, mais à des amplitudes de déformation de 25%, 50% et 75%. Les résultats ont montré une augmentation de la rigidité effective (k_s) du RB d'environ 112% par rapport à 20°C (voire la figure 1.20(a)). Tandis que le LRB montrait des augmentations d'environ 87% pour la rigidité élastique (k_1) et de 32% pour la rigidité post-élastique (k_2) (voire la figure 1.21(b)).

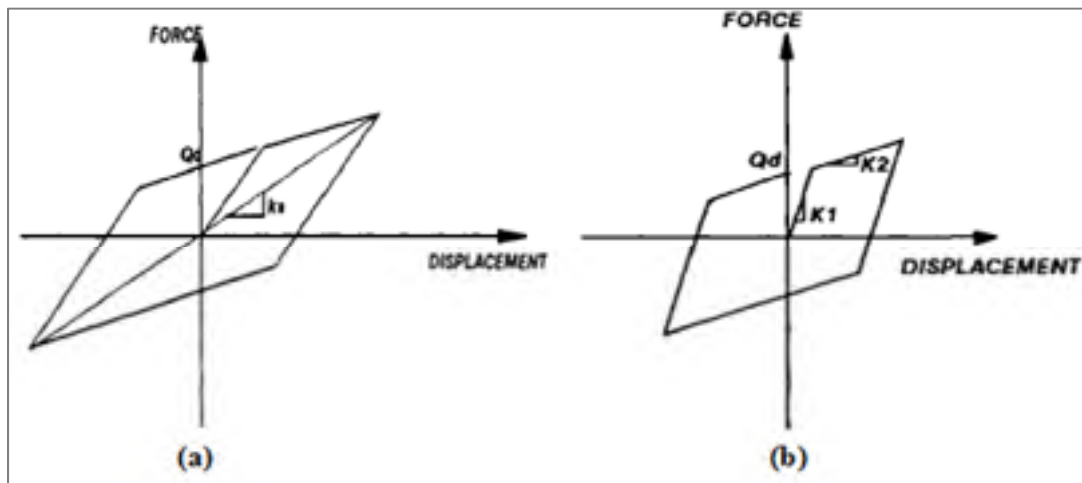


Figure 1.21 Définition des rigidités latérales pour (a) RB et (b) LRB
Tirée de Kim et al. (1996)

Yakut et Yura (2002)

Yakut et Yura (2002) ont effectué une étude expérimentale où les paramètres influençant la performance des appuis en élastomères frettés à basse température ont été investigués. Les appuis avaient les dimensions en plans 229 mm x 356 mm et une hauteur de 44,5 mm. Ils

étaient constitués de trois couches d'élastomères intercalées par deux frettes en acier tel que montré à la figure 1.22. Le néoprène (NEO) et le caoutchouc naturel (NR) ont été les deux matériaux testés, chacun avec deux valeurs spécifiques du module de cisaillement, 0,69 MPa (100 psi) et 1,03 MPa (150 psi). Afin de les identifier, les appuis ont été dénotés par NEO100, NEO150, NR100 et NR150.

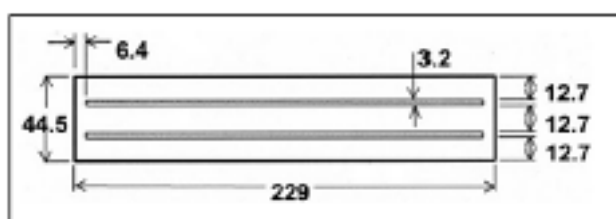


Figure 1.22 Coupe transversale des appuis (dimensions en mm)
Tirée de Yakut et Yura (2002)

Les spécimens ont été soumis à des charges latérales en cisaillement dans une seule direction jusqu'à déformation maximale de 30%, sous une force axiale de compression constante de 1,9 MPa pour les appuis moins rigides et 3,9 MPa pour les appuis rigides. Les températures d'expositions étaient de -10°C, -20°C et -30°C pour des périodes de conditionnement allant de 1 à 21 jours. La Figure 1.23 montre le comportement force-déplacement pour le NEO150 soumis à -20°C pour les différentes durées d'exposition considérées. Les résultats indiquent que la rigidité en cisaillement des appuis augmente avec l'augmentation de la durée de conditionnement à -20°C.

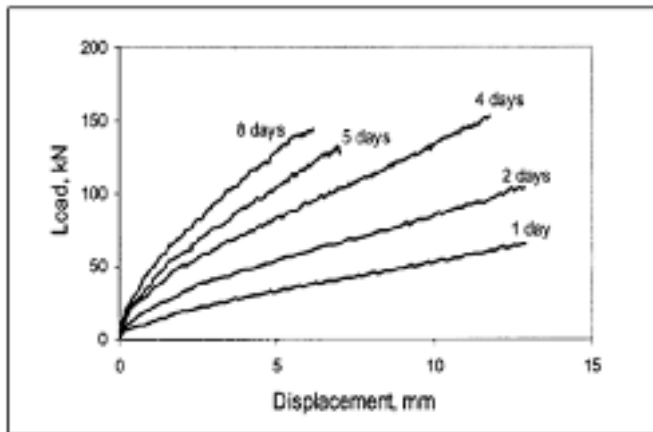


Figure 1.23 Courbes forces-déplacements du NEO150 sous température de -20°C
Tirée de Yakut et Yura (2002)

Les résultats des autres essais sont illustrés à la figure 1.24. Cette dernière montre la variation du module de cisaillement normalisé, qui représente le ratio entre le module de cisaillement à la température de l'essai et celui à température ambiante, avec la durée de conditionnement aux basses températures. Ces résultats indiquent que :

- tous les spécimens ont montré une rigidification plus importante à -30°C qu'aux températures supérieures de -10°C et -20°C . Les résultats indiquent aussi que, plus que la durée d'exposition est longue plus la rigidification est importante ;
- le module de cisaillement est influencé plus par la durée de conditionnement aux basses températures ;
- en général, les appuis ayant le module de cisaillement élevé se rigidifiaient plus ;
- le néoprène est plus sensible à la cristallisation que le caoutchouc naturel.

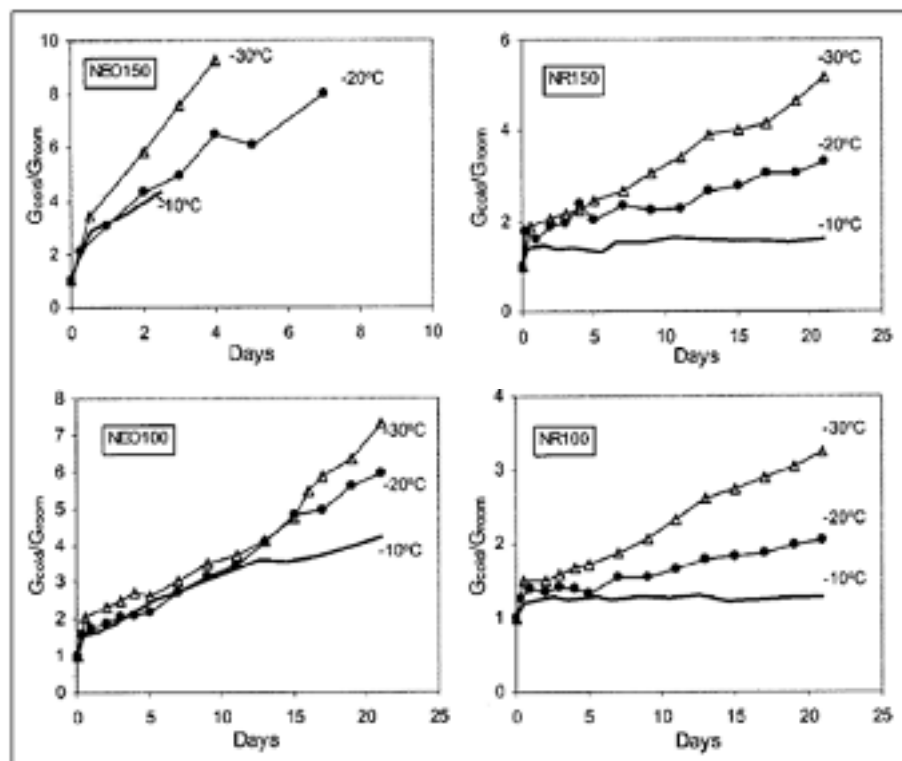


Figure 1.24 Variation du module de cisailment normalisée en fonction de la durée de conditionnement aux basses températures
Tirée de Yakut et Yura (2002)

Fuller et al. (2004)

Fuller et al. (2004) ont étudié expérimentalement le phénomène de la cristallisation à basse température de deux composés élastomères à amortissement élevé (HDNR) utilisés en isolation sismique. Un composé conventionnel et un autre modifié par ajout d'autres polymères, spécialement pour développer des composés adaptés aux expositions prolongées aux basses températures, ont été testés. Les élastomères ont été soumis à une température de -20°C et à une amplitude de déformation en cisailment de 35%. La Figure 1.25 montre la variation du module de cisailment en fonction de la durée de conditionnement pour les deux élastomères testés. Le composé HDNR conventionnel montre une augmentation significative du module de cisailment après environ 3 jours d'exposition à -20°C due à la cristallisation de l'élastomère. Tandis que le composé HDNR modifié rallonge la période d'induction à environ 20 jours et retarde la survenue de la cristallisation.

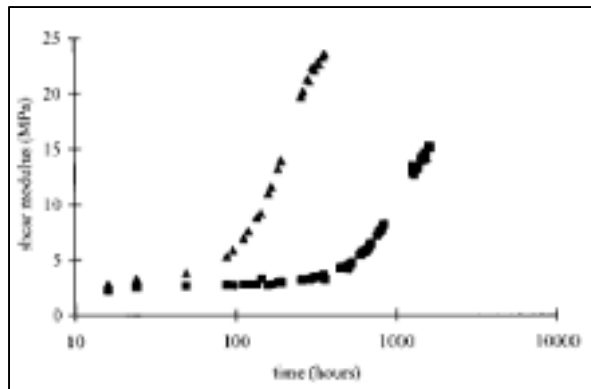


Figure 1.25 Variation du module de cisaillement en fonction de la durée de conditionnement à -20°C
Tirée de Fuller et al. (2004)

Constantinou et al. (2007)

Constantinou et al. (2007) ont réalisé des essais combinés en compression et cisaillement sur des isolateurs en RB et LRB afin de déterminer l'effet de basses températures sur leurs propriétés mécaniques. L'élastomère était du caoutchouc naturel (NR) à faible taux d'amortissement. Les isolateurs avaient la forme circulaire avec une hauteur de 248,9 mm et un diamètre de 406,4 mm, avec un noyau de plomb de 69,87 mm de diamètre pour le LRB. Ils avaient également 22 couches d'élastomère d'épaisseur de 8,89 mm et 21 frettes en acier de 2,0 mm d'épaisseur. Quatre cycles de charge/décharge complètement inversés ont été appliqués à une amplitude de déformation égale à 58% et une fréquence de 0,35 Hz, sous une contrainte de compression constante de 6,9 MPa. Les spécimens ont été testés d'abord à températures de 20°C après 48 heures de conditionnement, puis à -26°C pour une durée de conditionnement de 48 heures. Les Figures 1.26 et 1.27 montrent, respectivement, les courbes force-déplacement des isolateurs RB et LRB testés à température de 20°C et de -26°C . Les résultats montrent que pour le RB, la rigidité effective et l'amortissement visqueux équivalent augmentent d'environ 42% et 62% après 48 heures de conditionnement à -26°C , respectivement. Quant au LRB, les résultats montrent des augmentations d'environ 53% de la rigidité effective, de 37% de la rigidité post-élastique et de 13% pour l'amortissement visqueux équivalent.

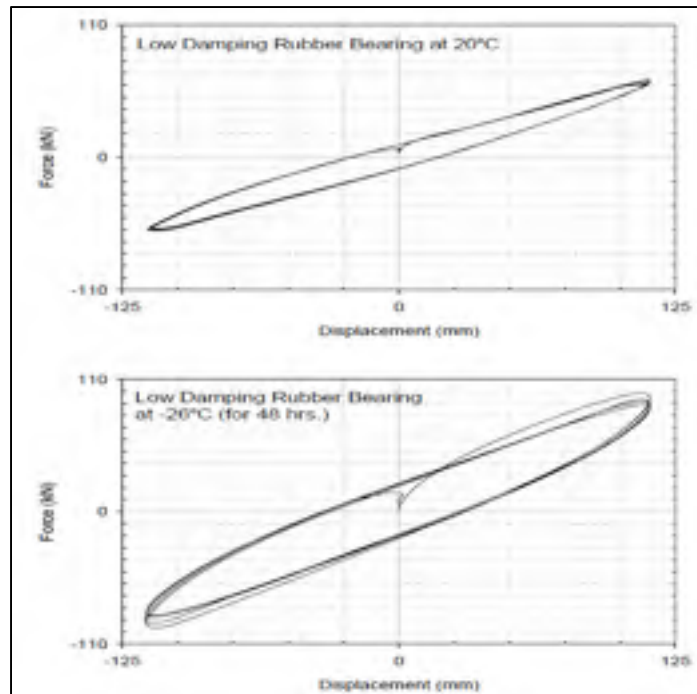


Figure 1.26 Courbes force-déplacement de l'isolateur RB testé à 20°C et à -26°C
Tirée de Constantinou et al. (2007)

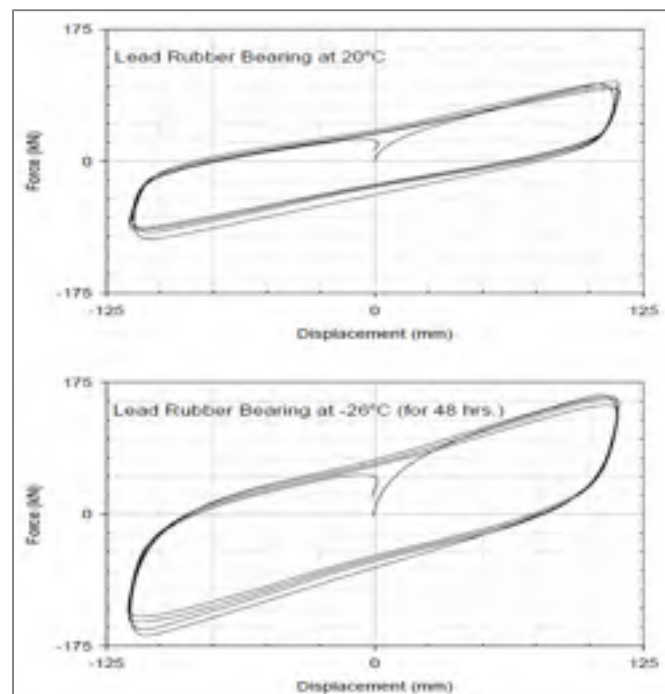


Figure 1.27 Courbes force-déplacement de l'isolateur LRB testé à 20°C et à -26°C
Tirée de Constantinou et al. (2007)

D. Cardone et Gesualdi (2012)

D. Cardone et Gesualdi (2012) ont étudié le comportement à basse température des élastomères utilisés dans la construction des isolateurs sismiques. Six compositions chimiques d'élastomères, provenant de deux usines de fabrication différentes situées en Italie, ont été testées. Les élastomères ont été divisés en trois groupes en fonction de leurs duretés identifiées par dur (H), normal (N) et normal-doux (SN), et de l'usine de provenance désignée par 1 ou 2 : H1, N1, SN1, H2, N2 et SN2. Les modules de cisaillement dynamique des élastomères à une température de 20°C et une déformation de 100% variaient de 0,5 à 1,2 MPa. Les spécimens consistaient en des blocs d'élastomère de dimensions en plan de 35 mm x 35 mm et de 10 mm d'épaisseur. Ils ont été collés de chaque côté à des plaques en aciers ayant les mêmes dimensions que les blocs d'élastomères. Les compositions chimiques des élastomères n'ont pas été spécifiées.

Les essais ont été conduits en deux parties. Dans la première partie, les spécimens ont été soumis à des températures allant de 40°C à -20°C (spécimens A) puis de -20°C à 40°C (spécimens B) pour des durées d'exposition variant entre 30 et 60 minutes, afin d'évaluer le comportement des élastomères sous différentes températures de l'air. Dans la deuxième partie, les élastomères ont été soumis à des températures de -10°C et de -20°C pour des durées de conditionnement comprises entre 1 et 24 heures, afin d'investiguer sur la cristallisation à basse température. Trois cycles de chargement complètement inversés ont été appliqués, en augmentant l'amplitude de déformation de 25 à 125% (avec un pas de 25%) à une fréquence de 0,5 Hz. En se basant sur les courbes contrainte-déformation issues des essais, les caractéristiques mécaniques telles que, le module de cisaillement sécant (G_{sec}), le taux d'amortissement équivalent (ξ_{eq}), la contrainte de cisaillement à déformation cyclique nulle (τ_0) et la contrainte de cisaillement maximales (τ_{max}) ont été déterminées et examinées (voir la figure 1.28).

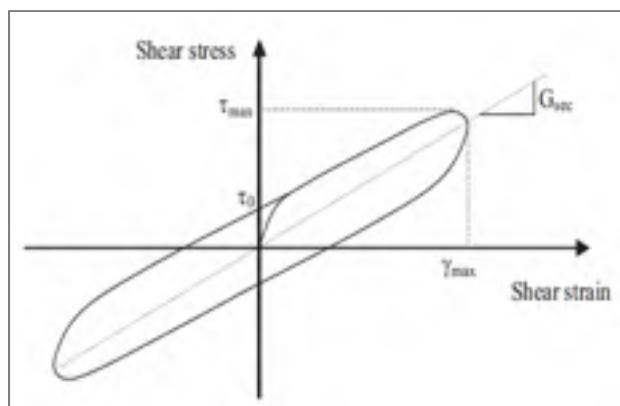


Figure 1.28 Définition des caractéristiques mécaniques des élastomères
Tirée de D. Cardone et Gesualdi (2012)

Les Figures 1.29 à 1.33 montrent les résultats de la première partie des tests, tandis que les figures 34 et 35 présentent les résultats de la deuxième partie. Les Figures 1.29 à 1.31 montrent, respectivement, les courbes contrainte-déformation des élastomères H1, N1 et SN1. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence entre les spécimens A et B, indiquant une sensibilité négligeable du comportement cyclique à l'effet de l'historique des températures d'essais déjà subis. Les résultats indiquent aussi qu'à mesure que la température diminue les niveaux de contraintes maximales et les aires des courbes d'hystérésis augmentent, qui s'accroissent plus quand la température descend en dessous de 0°C. Comme exemple, la contrainte correspondant à une déformation de 100% augmente d'environ 1,5 et 2,5 fois lorsque la température diminue de 20°C à -10°C et à -20°C, respectivement.

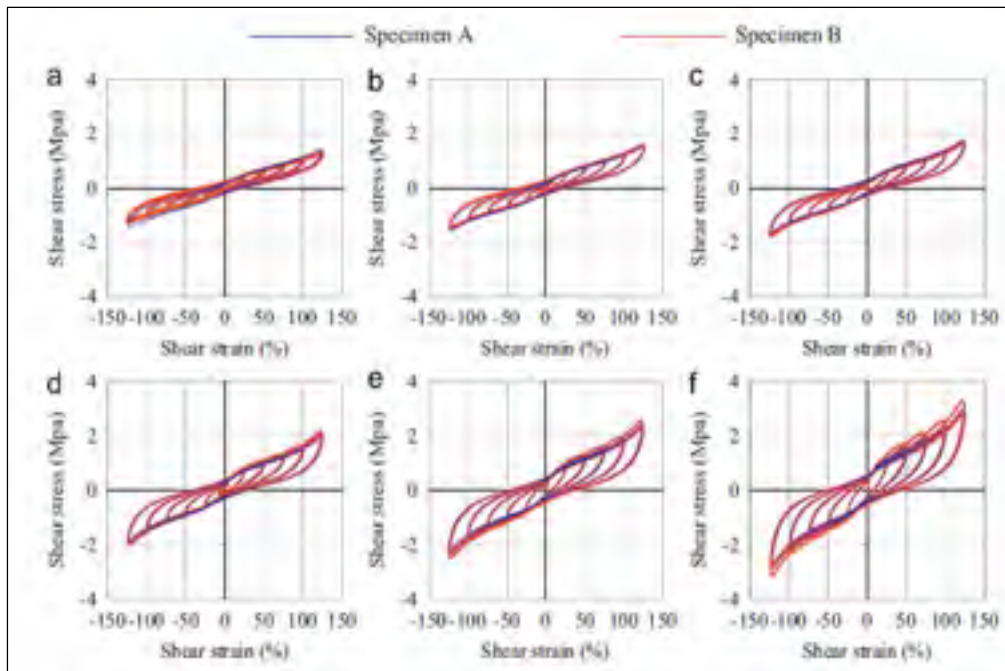


Figure 1.29 Courbes contrainte-déformation de l'élastomère H1 à des températures :
 (a) 40°C, (b) 20°C, (c) 10°C, (d) 0°C, (e) -10°C et (f) -20°C
 Tirée de D. Cardone et Gesualdi (2012)

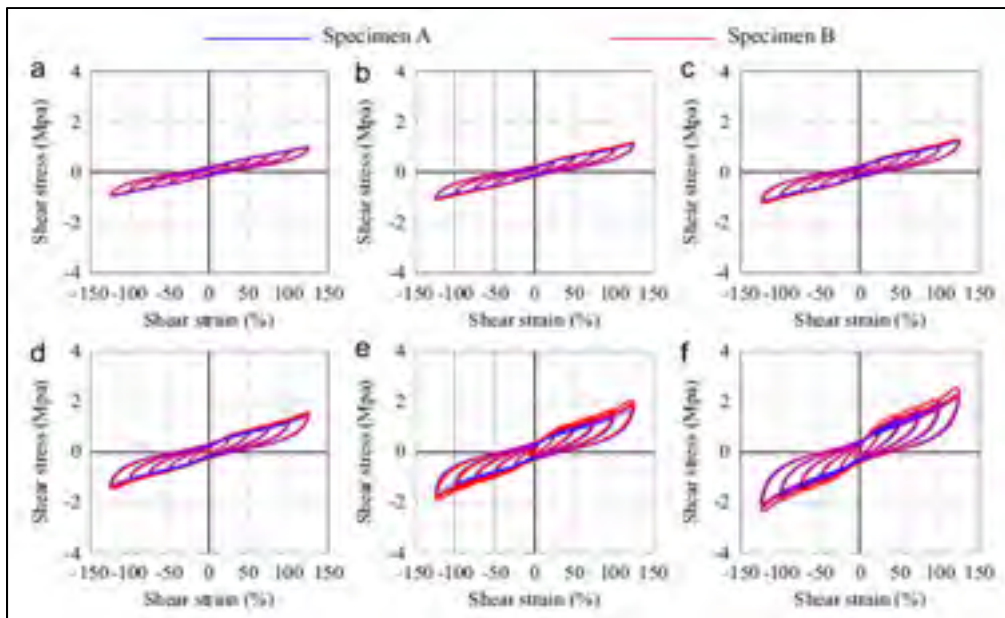


Figure 1.30 Courbes contrainte-déformation de l'élastomère N1 à des températures :
 (a) 40°C, (b) 20°C, (c) 10°C, (d) 0°C, (e) -10°C et (f) -20°C
 Tirée de D. Cardone et Gesualdi (2012)

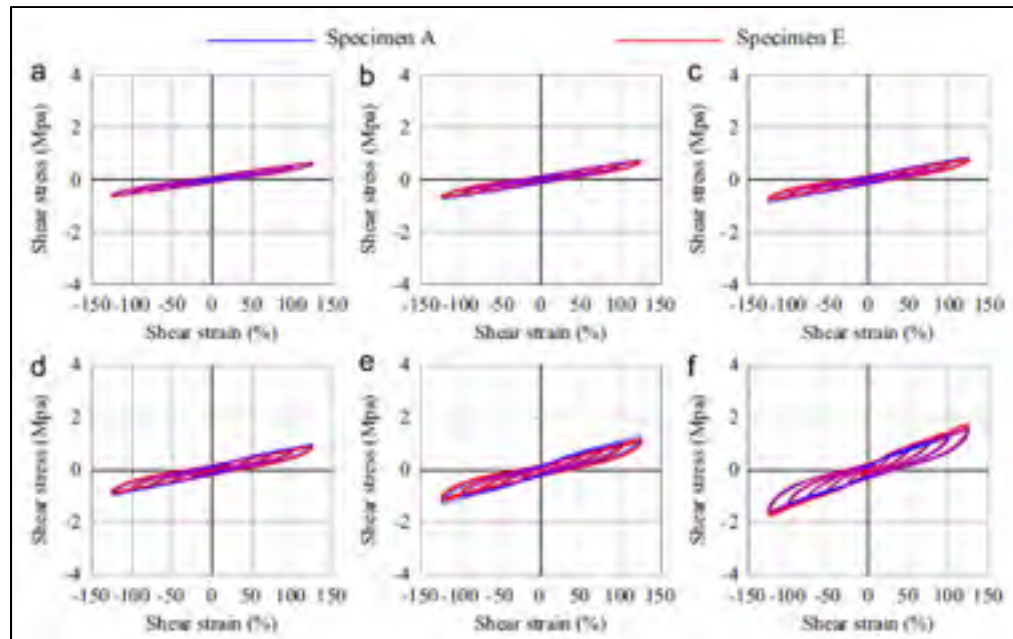


Figure 1.31 Courbes contrainte-déformation de l'élastomère SN1 à des températures :
 (a) 40°C, (b) 20°C, (c) 10°C, (d) 0°C, (e) -10°C et (f) -20°C
 Tirée de D. Cardone et Gesualdi (2012)

La Figure 1.32 montre la variation des caractéristiques mécaniques des élastomères H1, N1 et SN1 avec la température d'exposition pour les différentes amplitudes de déformations imposées, correspondant au troisième cycle de charge. Les résultats montrent que G_{sec} reste presque constant pour les températures supérieures à 20°C, et qu'il augmente pour les températures en dessous de 0°C. Le taux d'amortissement (ξ_{eq}) augmente avec la diminution de la température pour les élastomères H1 et N1, tandis qu'il reste presque inchangé pour l'élastomère SN1. Finalement, les contraintes (τ_0) et τ_{max} augmentent aussi linéairement quand la température baisse pour les trois élastomères.

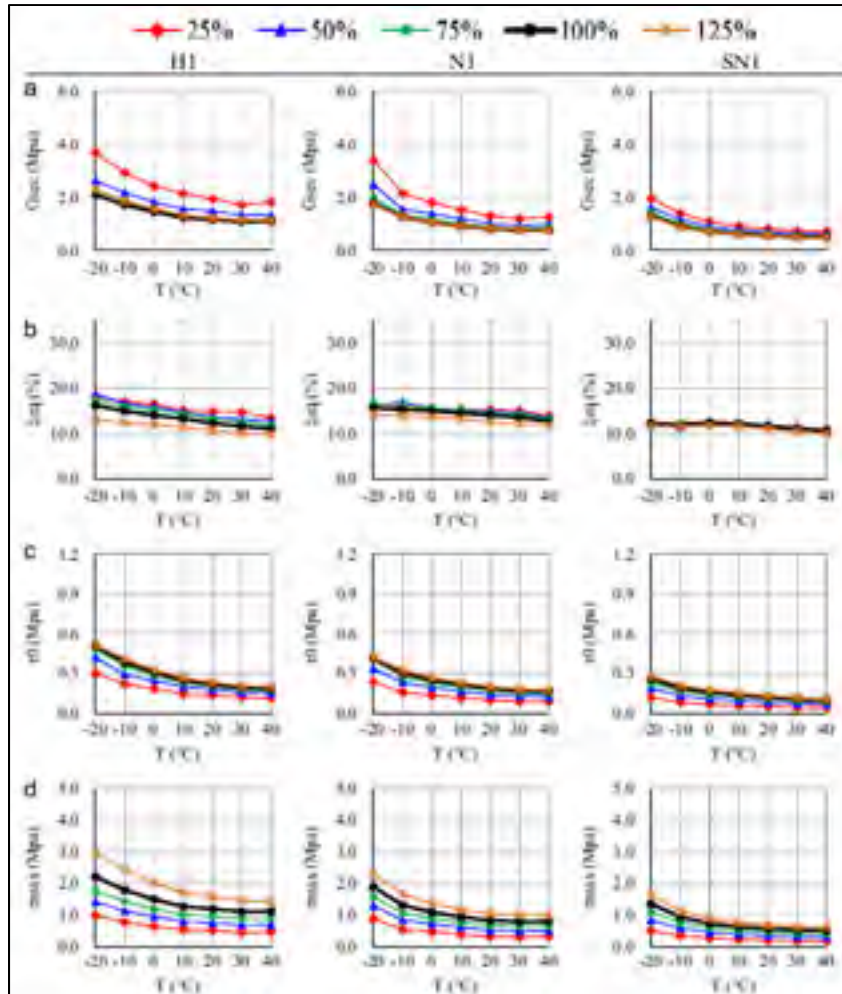


Figure 1.32 Variation des propriétés mécaniques des élastomères H1, N1 et SN1 en fonction de la température pour les différentes amplitudes de déformation imposées
Tirée de D. Cardone et Gesualdi (2012)

La Figure 1.33 montre la variation des caractéristiques mécaniques avec l'amplitude de déformation des élastomères H1, N1 et SN1 pour les différentes températures, correspondant au troisième cycle de charge. Les résultats indiquent que G_{sec} diminue avec l'augmentation de l'amplitude de déformation. Cette diminution est plus importante à faible déformation (25 à 50%) que pour les grandes amplitudes (100 et 125%). Par exemple, à 25% de déformation G_{sec} est plus grands en moyenne de 60 à 80% que celui calculé à 100% de déformation. Le taux d'amortissement (ξ_{eq}) pour les élastomères H1 et N1 diminue avec l'augmentation de l'amplitude de la déformation, tandis qu'il reste pratiquement constant pour l'élastomère

SN1. Finalement, les contraintes (τ_0) et τ_{max} augmentent presque linéairement quand la déformation augmente pour les trois élastomères.

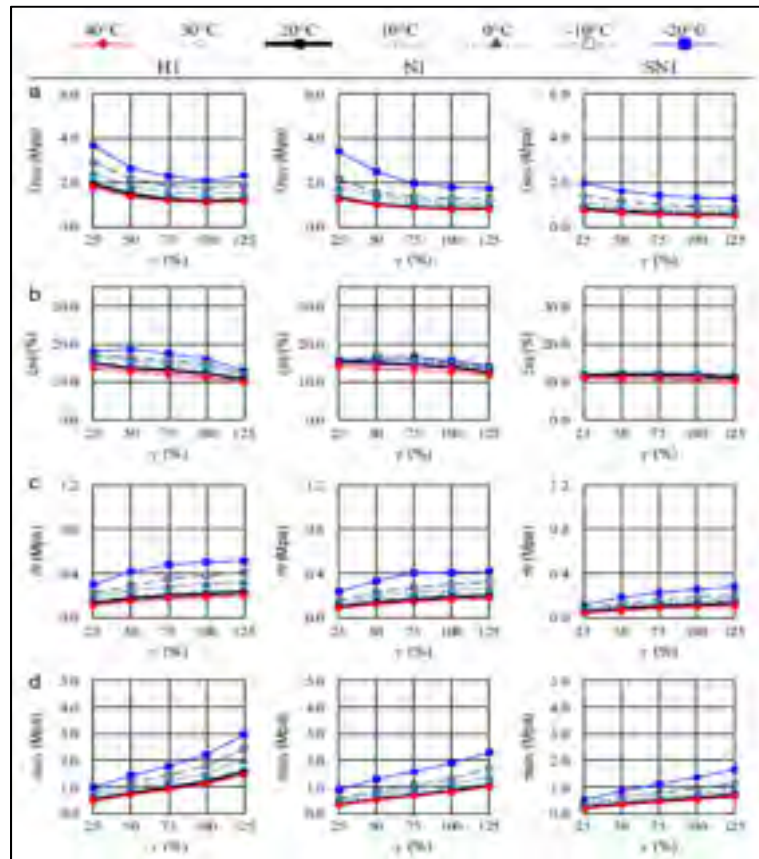


Figure 1.33 Variation des propriétés mécaniques des élastomères H1, N1 et SN1 en fonction de l'amplitude de déformation pour les différentes températures
Tirée de D. Cardone et Gesualdi (2012)

La Figure 1.34 montre les courbes contrainte-déformation de l'élastomère H1 soumis à -10°C et -20°C pour les différentes durées de conditionnement. Les résultats indiquent que le niveau de contrainte maximale augmente avec l'augmentation de la durée de conditionnement, qui est due à la cristallisation de l'élastomère. Il est observé aussi une diminution de la contrainte maximale entre le premier et le troisième cycle de chargement au même niveau de déformation. Cette diminution est due principalement au réchauffement interne de l'élastomère durant le chargement cyclique causé par la dissipation d'énergie par hystérésis.

Par exemple, le rapport des contraintes maximales entre le premier et le troisième cycle est d'environ 1,3 après 24 h de conditionnement à -20°C .

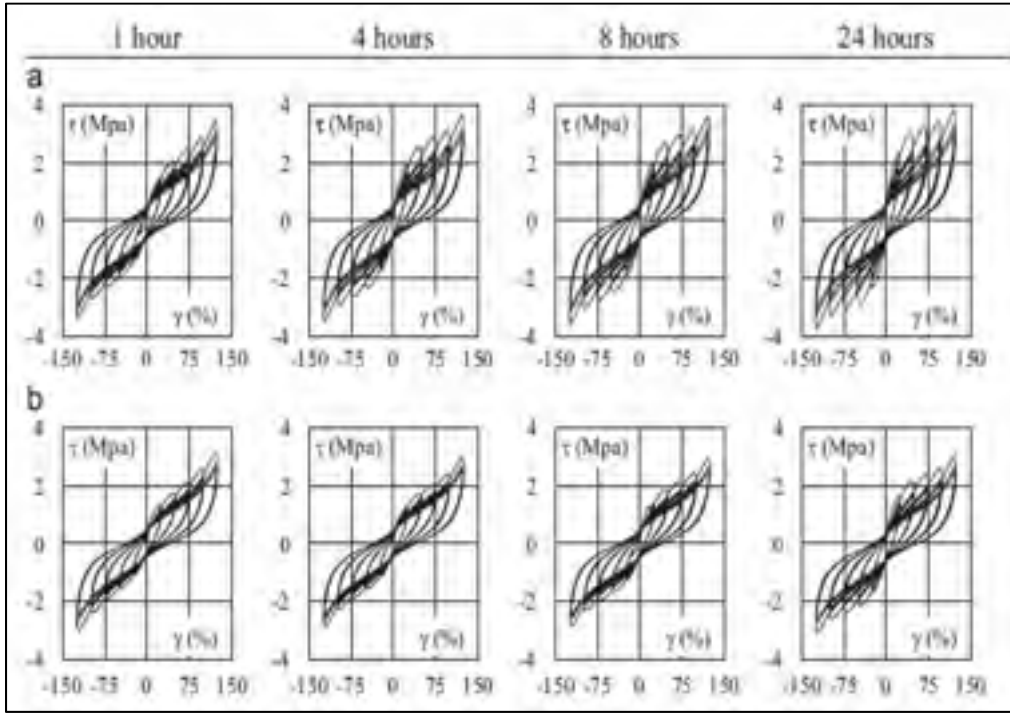


Figure 1.34 Courbes contrainte-déformation de l'élastomère H1 après 1, 4, 8 et 24 h de conditionnement à (a) -20°C et (b) -10°C
Tirée de D. Cardone et Gesualdi (2012)

La Figure 1.35 montre la variation des caractéristiques mécaniques en fonction de la durée de conditionnement à -20°C des élastomères H1, N1 et SN1 pour les différentes amplitudes de déformation, correspondant au troisième cycle de charge. Les résultats montrent que G_{sec} augmente avec l'augmentation de la durée de conditionnement à -20°C . Comparativement à 20°C , cette augmentation est de l'ordre de 50 à 150% après 24 h d'exposition à -20°C pour les faibles niveaux de déformations (25 à 50%), tandis qu'elle ne dépasse pas les 30% pour les amplitudes de grandes déformations (100% et 125%). Le taux d'amortissement (ξ_{eq}) ne change pas de façon significative avec la durée de conditionnement et cela pour tous les niveaux de déformation considérés. Finalement, les contraintes (τ_0) et τ_{max} montrent des

augmentations importantes entre 1 h et 4 h de conditionnement, suivi d'une légère augmentation jusqu'à 24 h de conditionnement.

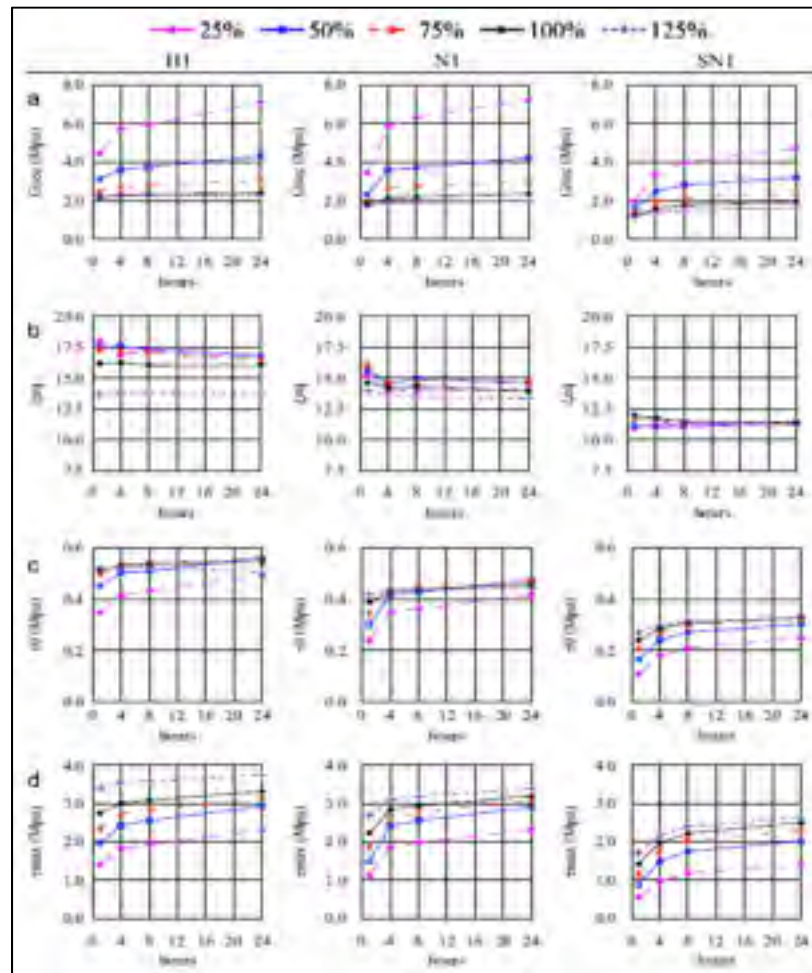


Figure 1.35 Variation des propriétés mécaniques des élastomères H1, N1 et SN1 en fonction de la durée de conditionnement à -20°C pour différentes amplitudes de déformation
Tirée de D. Cardone et Gesualdi (2012)

1.6 Facteurs de modification de propriétés mécaniques des isolateurs

Durant leur vie de service, les unités d'isolations sismiques en élastomères sont influencées par plusieurs facteurs tels que le vieillissement, la vitesse de charge, la température, la contamination, la fatigue (l'usure) et le scragging, entraînant ainsi des changements dans leurs propriétés mécaniques (Constantinou et al., 2007). Afin de tenir compte de ces facteurs,

le code AASHTO (2010) propose un concept, qui est également adopté par le code canadien des ponts roturiers (CSA, 2014a), de conduire deux analyses : l'une en considérant les propriétés minimales du système d'isolation et l'autre avec les propriétés maximales de telle sorte à délimiter sa réponse en termes de force et déplacement comme montré à la figure 1.36. Cela est réalisé en multipliant les propriétés nominales de la relation bilinéaire force-déplacement du système d'isolation, à savoir la résistance caractéristique (Q_d) et la rigidité post-élastique (K_d) par les facteurs de modifications des propriétés maximales et minimales dénotées par λ_{max} et λ_{min} , respectivement. Ces facteurs sont obtenus en multipliant les facteurs de modifications individuelles maximales ($\lambda_{max,i}$) et minimales ($\lambda_{min,i}$) relatifs à chaque facteurs de vieillissement, vitesse, température, contamination, fatigue et scragging. Le code AASHTO (2010) stipule que les valeurs des facteurs $\lambda_{max,i}$ et $\lambda_{min,i}$ sont déterminées par des essais expérimentaux effectués sur prototypes d'isolateurs ou en utilisant, dans le cas d'absence de tests, directement les valeurs données en annexe A du même code. Ces valeurs sont basées sur les études antérieures effectuées par Constantinou, Tsopelas, Kasalanati, et Wolff (1999) et Constantinou et al. (2007). Les Tableaux 1 à 3 présentent les valeurs des facteurs de modification dus aux effets de vieillissement, de la température et du scragging pour les isolateurs en élastomère à faible et haut taux d'amortissement donnés par le code AASHTO (2010).

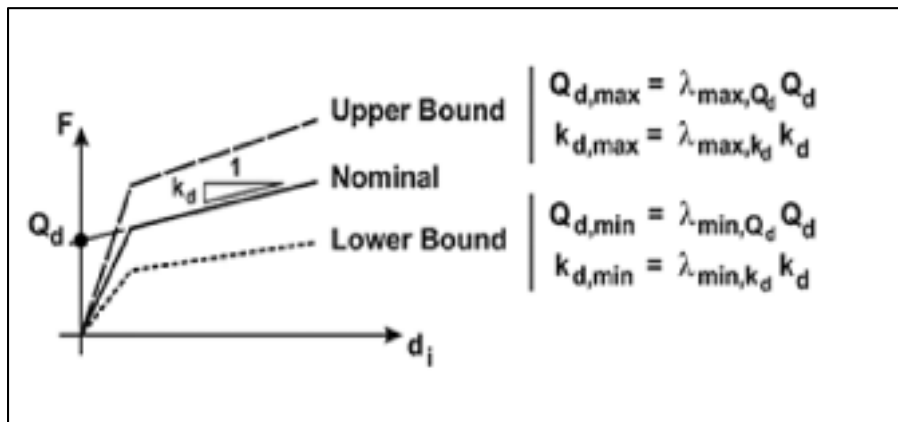


Figure 1.36 Propriétés maximales et minimales du système d'isolation pour analyse
Tirée (CSA, 2014b)

Tableau 1.1 Facteurs de modification des propriétés pour le vieillissement

	K_d	Q_d
Caoutchouc naturel à faible amortissement	1,1	1,1
Caoutchouc naturel à amortissement élevé avec un faible écart entre les propriétés scragged et unscragged	1,2	1,2
Caoutchouc naturel à amortissement élevé avec un grand écart entre les propriétés scragged et unscragged	1,3	1,3
Plomb	-	1,0
Néoprène	3,0	3,0

Tableau 1.2 Facteurs de modification des propriétés pour la température

Température minimale de conception (°C)	Q_d			K_d		
	HDRB ^{a, c}	HDRB ^{b, c}	LDRB ^{b, d}	HDRB ^{a, c}	HDRB ^{b, c}	LDRB ^{b, d}
21	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1
-10	1,4	1,4	1,4	1,4	1,2	1,1
-30	2,5	2,0	1,5	2,0	1,4	1,3

a : Les propriétés unscragged sont supérieures aux propriétés scragged de 25% et plus

b : Les propriétés unscragged sont supérieures aux propriétés scragged de moins de 25%

c : Isolateurs en élastomère à amortissement élevé (HDRB)

d : Isolateurs en élastomère à faible amortissement (LDRB)

Tableau 1.3 Facteurs de modification des propriétés pour le scragging

Q_d			K_d		
LDRB	HDRB avec $\xi_{eq} < 0,15$	HDRB avec $\xi_{eq} > 0,15$	LDRB	HDRB avec $\xi_{eq} < 0,15$	HDRB avec $\xi_{eq} > 0,15$
1,0	1,2	1,5	1,0	1,2	1,8

 ξ_{eq} : Amortissement visqueux équivalent

CHAPITRE 2

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Introduction

Une série d'essais expérimentaux ont été conduits afin d'examiner le comportement dynamique en cisaillement sous basses températures de trois types de formulations d'élastomères déjà utilisés et/ou en développement pour des applications d'isolations sismiques au Canada. Plus spécifiquement, des échantillons en élastomères à échelle réduite sont soumis à des cycles de charge/décharge en cisaillement sur machine MTS au laboratoire. L'influence de la température d'exposition, de la durée de conditionnement au froid et de l'amplitude de déformation sont, particulièrement, étudiés. Ce chapitre décrit la phase expérimentale et présente le type, les dimensions et nombre des spécimens, les paramètres de l'étude, l'appareillage ainsi que la procédure des essais.

2.2 Description des spécimens

Les spécimens considérés pour les tests sont des Quad-Shear standard à échelle réduite, où quatre blocs de caoutchoucs sont collés à des barres d'acier par vulcanisation. Ils ont été fournis par la compagnie canadienne Goodco Z-Tech, du groupe Canam-ponts, sise à Laval, Québec. La forme et les dimensions des spécimens sont conformes à celles recommandées par le standard (ASTM D4014, 2007). La Figure 2.1 et la Figure 2.2 montrent, respectivement, un plan indiquant les dimensions des spécimens et une photo des spécimens typiques utilisés dans les essais. Les blocs de caoutchoucs ont les dimensions en plan de 25,4 mm x 25,4 mm et une épaisseur de 6,0 mm. Le choix de ce type de spécimens est justifié, d'une part, par leur stabilité aux chargements cycliques latéraux inversés (Kulak & Hughes, 1993), et d'autre part, par le coût très élevé qu'engendreraient les essais sur isolateurs à grandeur réelle en termes d'équipements et de temps. Trois composés élastomères ont été testés. Le premier composé est en caoutchouc naturel à faible taux d'amortissement de dureté Shore A égale à 54 identifié par composé NAT55. Les deux autres sont en caoutchouc

naturel à amortissement élevé identifié par composé B et composé E ayant des duretés 54 et 59 sur l'échelle Shore A, respectivement. Les résultats des tests de base exigés par code canadien des ponts routiers (CSA, 2014a), effectuées par le fournisseur sont présentés au tableau 2.1. Il est constaté que les composés B et E n'atteignent pas la résistance minimale en traction exigée par le code, laquelle est de 17,0 MPa. Il est à noter aussi que le composé E ne répond pas à l'exigence du code concernant l'essai de cristallisation à basse température, qui présente un accroissement de dureté de +28,5 points sur l'échelle Shore A, alors que le code exige un accroissement maximum de +15 points. Le composé B, quant à lui, présente un accroissement de +15,5 points sur l'échelle Shore A, laquelle est très proche de la limite maximale exigée par le code. Le résultat de l'essai de cristallisation du composé NAT55 n'a pas été fourni.

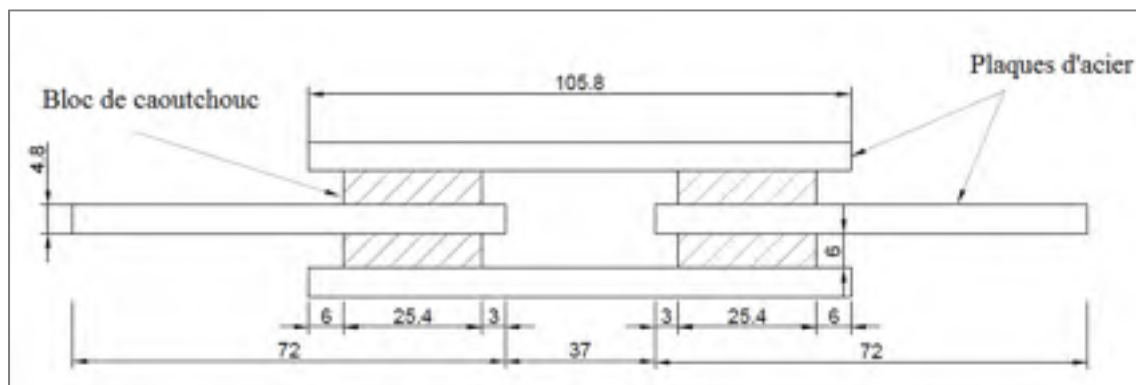


Figure 2.1 Plan montrant les dimensions des spécimens d'essai (mm)



Figure 2.2 Photo des spécimens typiques testés

Tableau 2.1 Résultats des tests de base exigés dans le code CSA, 2014a

Propriétés	Essai ASTM Standard	Composé NAT55	Composé B	Composé E
Dureté Shore A	D-2240	54	54	59
Résistance à la traction, MPa	D-412	29,2	15,0	15,9
Allongement à la rupture, %	D-412	591	512	548
Résistance à la chaleur, 70 h à 70°C	D-573			
Variation de la dureté, Shore A		+ 3,5	+ 3,0	+ 3,5
Variation de la résistance en traction, %		- 5,94	- 4,36	- 11,08
Variation de l'allongement à la rupture, %		- 3,55	- 20,31	- 6,93
Compression rémanente, % 22 h à 70°C	D-395 Méthode B	19,37	21,97	23.72
Cristallisation à basse température, 168 h à -25°C	D-2240	-	+15,5	+28,5
Accroissement de la dureté, Shore A				

2.3 Choix des températures des essais

Le code canadien sur le calcul des ponts routiers (CSA, 2014a) prescrit des essais à basse température à effectuer sur prototypes d'isolateurs en élastomères afin de vérifier leurs niveaux de performance par temps froid et valider, ainsi les facteurs de modification prévus lors de la conception du pont isolé. Ces essais sont réalisés à deux températures d'exposition selon la localité du projet d'isolation sismique. La première est la température minimale de service, laquelle est égale à la température journalière moyenne minimale du site donnée par la figure 2.3. Cette température est choisie de sorte à simuler la demande d'un séisme faible se produisant à très basse température (CSA, 2014b). La deuxième est la température minimale en service concomitante qui est prise égale à la moyenne entre 15°C et la température journalière moyenne minimale de service. Cette température est plus susceptible de se produire lorsque la demande en déplacement sismique correspondant à une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans est imposée à la structure (CSA, 2014b). Dans le cadre de ce projet, la localité de Montréal est choisie donnant aux températures d'exposition du site les valeurs de -8,5°C et -32°C. Ainsi, pour ce projet, le choix s'est porté sur les deux températures de -8°C et -30°C lesquelles sont, généralement, employées dans les devis sur les essais de qualification pour cette localité. En outre, la température de 20°C a été, également, choisie comme température de référence ou température pièce. Par ailleurs, il convient de mentionner que la température de -30°C est proche de celle où le caoutchouc naturel se cristallise le plus vite, à savoir la température de -25°C, tel que rapporté dans la littérature. Quant à la température de -8°C, celle-ci est proche de la température où la cristallisation du néoprène se produit le plus rapidement également, laquelle est de -10°C (Roeder et al., 1990).

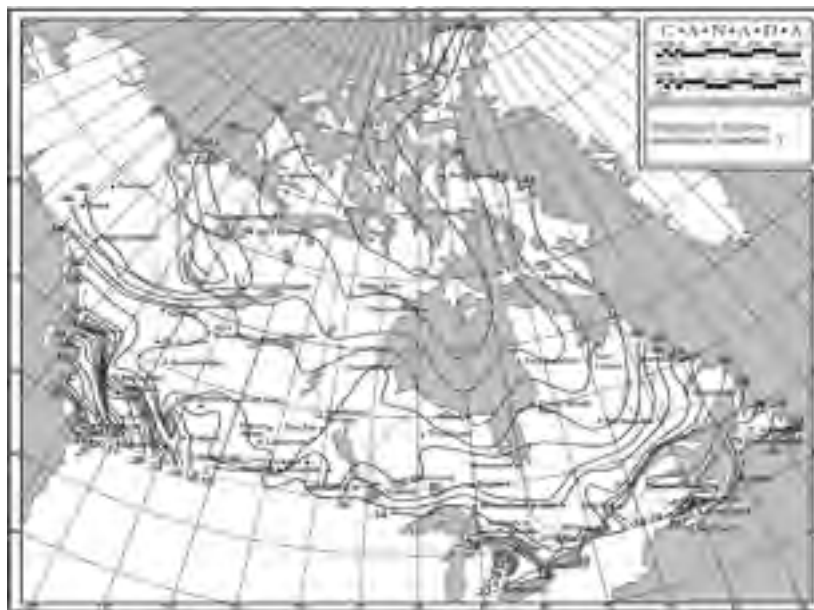


Figure 2.3 Cartographie des températures moyennes journalières minimales du Canada
Tirée de CSA (2014a)

2.4 Paramètres de l'étude et plan expérimental

Un total de 11 spécimens du composé NAT55 et 9 spécimens pour chacun des composés B et E ont été testés à températures de 20°C, -8°C et -30°C. Ces dernières sont représentatives des températures exigées par le code canadien (CSA, 2014a) pour la ville de Montréal et les environs comme mentionnés plus haut. Dans le but d'étudier l'influence de la durée d'exposition aux basses températures, plusieurs durées de conditionnement aux températures d'essais ont été considérées. Celles-ci sont de 15 minutes, 30 minutes, 1 heure, 24 heures, 3 jours (72 h), 7 jours et 14 jours. Les courtes durées de conditionnement (inférieure ou égale à 1 h) ont été considérées afin d'étudier sur le raidissement thermique instantané. Ces durées ont été estimées selon le standard (ASTM D832, 2007) relatif à la procédure de conditionnement des élastomères à basse température pour des essais mécaniques. Tandis que, les longues périodes (24 h à 14 j) ont été considérées afin d'évaluer l'effet du raidissement correspondant à la cristallisation d'élastomère. La durée maximale de 14 jours de conditionnement choisie, correspond à la durée minimale de conditionnement spécifiée

par le code CSA (2014a) relativement aux essais de qualification sur isolateurs sismiques de ponts en élastomères. Trois cycles de charge/décharge sinusoïdale ont été appliqués en incrémentant le taux de déformation de 25 à 150% avec un pas de 25%, tel que montré à la figure 2.4. Les faibles amplitudes (inférieure à 50%) sont choisies afin de représenter les conditions de service, les séismes faibles (D. Cardone & Gesualdi, 2012) et typiquement les cycles initiaux de séismes importants situés loin de la faille sismique. Tandis que les grandes déformations (100 à 150%) représentent les déplacements atteints sous séismes modérés à forts. L'application de trois cycles à chaque amplitude, découle du fait que le nombre de cycles de forte amplitude d'un séisme est typiquement de quelques cycles, que la courbe d'hystérésis se stabilise essentiellement au troisième cycle et que les propriétés des élastomères sont souvent déterminées à ce cycle de chargement (Thompson et al., 2000).

Les tests ont été conduits sous déplacements contrôlés avec une fréquence de 0,5 Hz. Afin d'éliminer les effets du "scragging", les spécimens en caoutchouc à amortissement élevé (composés B et E) ont été pré-déformés (scragged) en les soumettant préalablement au même chargement cyclique incrémental défini en haut à température de 20°C. Le Tableau 2.1 et le Tableau 2.2 illustrent, respectivement, les paramètres de l'étude pour les différentes séquences des essais effectués sur le composé NAT55 et les composés B et E.

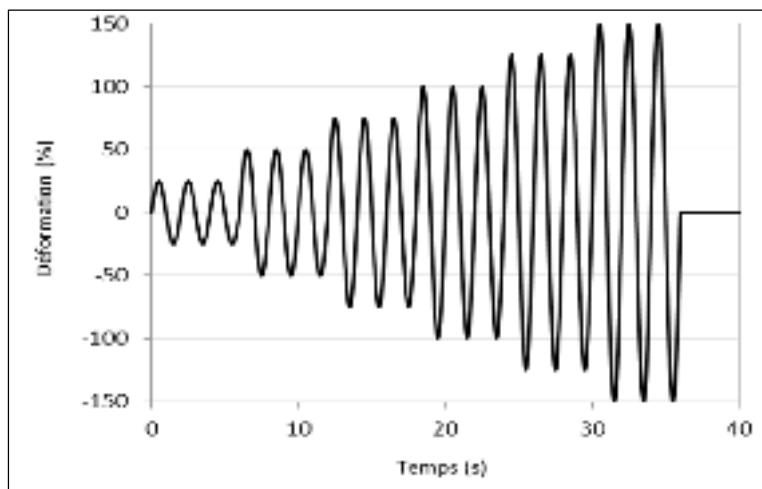


Figure 2.4 Courbe des déformations cycliques sinusoïdales imposées

2.4.1 Évaluer l'effet du réchauffement durant les cycles initiaux d'amplitude croissante

Pendant le chargement cyclique incrémental, la température interne de l'élastomère augmente à cause de la dissipation de l'énergie hystérétique qui se transforme en chaleur (Constantinou et al., 2007). Afin d'évaluer l'effet du réchauffement sur les propriétés hystérétiques des spécimens du composé NAT55 lors des cycles initiaux, des tests additionnels ont été conduits en soumettant deux spécimens à trois cycles de charge/décharge sinusoïdale d'amplitude égale à 150% de déformation directement (sans passer par les cycles initiaux d'amplitude incrémentale) après 14 jours de conditionnement à la température cible. Les résultats sont comparés avec ceux des deux spécimens subissant les mêmes conditions, mais avec un chargement incrémental, tel que décrit plus haut. En outre, afin de mesurer l'augmentation de la température pendant le chargement cyclique incrémental, un thermocouple a été inséré dans un trou réalisé dans le bloc d'élastomère d'un spécimen du composé NAT55 avant mise à l'essai. Le spécimen a été refroidi de la température ambiante jusqu'à ce que le thermocouple indique l'atteinte de la température cible, puis soumis au chargement cyclique incrémental défini plus haut. La Figure 2.5 et la Figure 2.6 montrent, respectivement, l'augmentation de la température interne sous chargement cyclique incrémental des essais effectués aux températures de -8°C et de -30°C . Il est constaté que la température interne augmente durant le chargement cyclique incrémental de 25 à 150%. L'augmentation maximale atteinte est d'environ 2°C pour l'essai effectué à -8°C et d'environ $4,5^{\circ}\text{C}$ pour l'essai effectué à -30°C . Ceci dénote que l'augmentation de la température interne dépend de la température initiale de l'essai, et que cette augmentation est plus importante à mesure que la température de l'essai est plus basse.

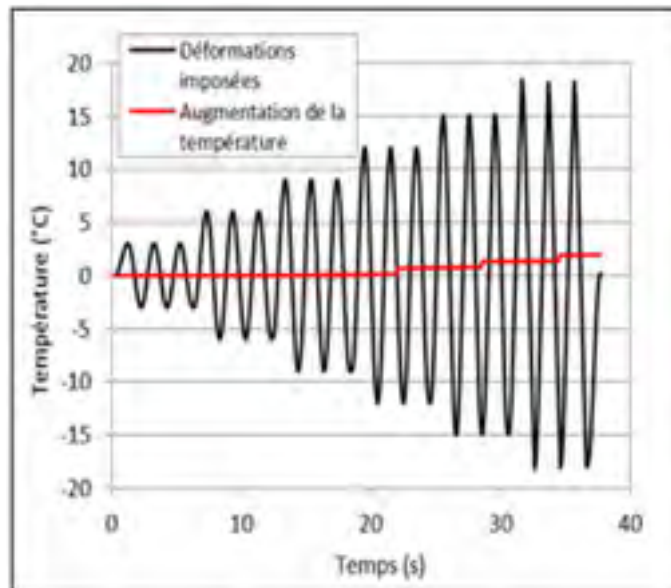


Figure 2.5 Augmentation de la température interne du composé NAT55 durant le chargement cyclique incrémental à température de -8°C

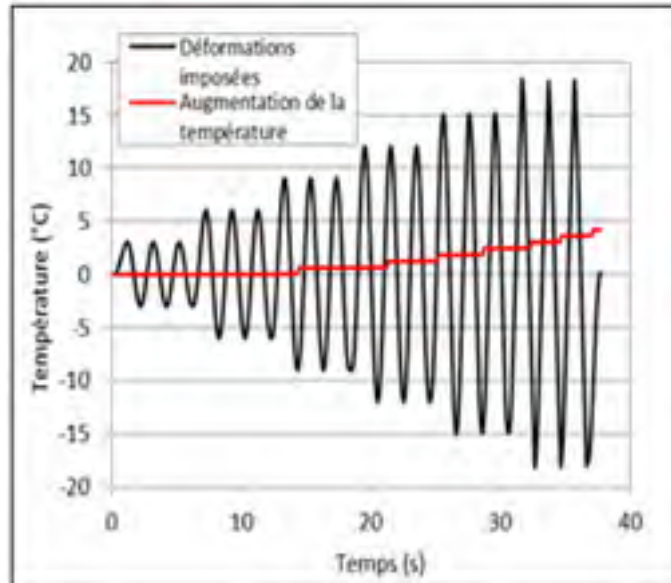


Figure 2.6 Augmentation de la température interne du composé NAT55 durant le chargement cyclique incrémental à température de -30°C

2.4.2 Isoler l'effet du recouvrement après scragging

Dans le but d'isoler l'effet du recouvrement des propriétés des composés B et E, durant le conditionnement aux basses températures, des tests additionnels ont été effectués sur des spécimens à l'état vierge (initial) et pré-déformé (scragged). En particulier, pour chacun des composés deux spécimens ont été testés. Le premier a été conditionné à l'état vierge pendant 14 jours à température cible puis soumis au chargement cyclique incrémental défini plus haut. Le deuxième a subi un chargement cyclique incrémental jusqu'à 150% (décrit plus haut) à température ambiante puis conditionné directement à température cible et soumis au même essai que le premier. La période de 14 jours est choisie puisque celle-ci représente la durée maximale de conditionnement considérée dans ce projet.

Tableau 2.2 Paramètres et séquences des essais du composé NAT55

Type	Spécimen	Température	Durée de conditionnement	Déformation (%)	Cycles
NAT55	11	20°C	45 min	25-50-75-100-125-150	3 x 6
NAT55	1	-8°C ; -30°C	15min-30min-1h-24h	25-50-75-100-125-150	3 x 6
	2		15min-30min-1h-24h		
	3		3 j		
	4		3 j		
	5		7 j		
	6		7 j		
	7		14 j		
	8		14 j		
NAT55	9 10	-8°C ; -30°C	14 j	150	3 x 1

Tableau 2.3 Paramètres et séquences des essais des composés B et E

Type	Spécimen	vierge	scragged	Température	Durée de conditionnement	Déformation (%)	Cycles
B ; E	1 ; 2		✓	20°C	45 min	25-50-75-100-125-150	3 x 6
B ; E	1		✓	-8°C ; -30°C	15min-30min-1h-24h	25-50-75-100-125-150	3 x 6
	2		✓		15min-30min-1h-24h		
	3		✓		3 j		
	4		✓		7 j		
	5		✓		14 j		
	6		✓		14j		
B ; E	7	✓		-8°C ; -30°C	14 j	150	3 x 6
	8		✓				
	9	✓					

2.5 Description de l'appareillage

La machine d'essai est une presse hydraulique MTS Landmark. Elle est constituée d'un bras de fixation inférieur et d'un vérin supérieur sur lesquels les spécimens ont été installés comme montré à la figure 2.7(b). Le bras inférieur est fixe, tandis que le vérin supérieur est mobile et permet d'imposer des déplacements quasi statiques ou dynamiques aux spécimens. De plus, la presse est équipée d'une enceinte thermique avec un système de réfrigération/chauffage mécanique travaillant entre les températures de -34°C à $+100^{\circ}\text{C}$ avec une précision de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (voir la figure 2.7(a)). Les déplacements du vérin et la température sont entièrement contrôlés par ordinateur et peuvent être programmés d'avance selon les séquences de conditionnement thermique et de chargement désirées. Afin de contrôler la température à l'intérieure de l'enceinte thermique pendant les essais, deux thermocouples et un capteur de température à résistance (sonde de température model Pt100) ont été installés proche du spécimen permettant d'enregistrer la température de l'air proche du spécimen (voir la figure 2.7(b)). Une chambre réfrigérée travaillant entre les températures de -73°C à $+200^{\circ}\text{C}$ avec une précision de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ est, également, utilisée pour les longues durées de conditionnement de spécimens, à l'intérieure de laquelle neuf thermocouples ont été installés afin de contrôler la température pendant le conditionnement (voir la figure 2.8).

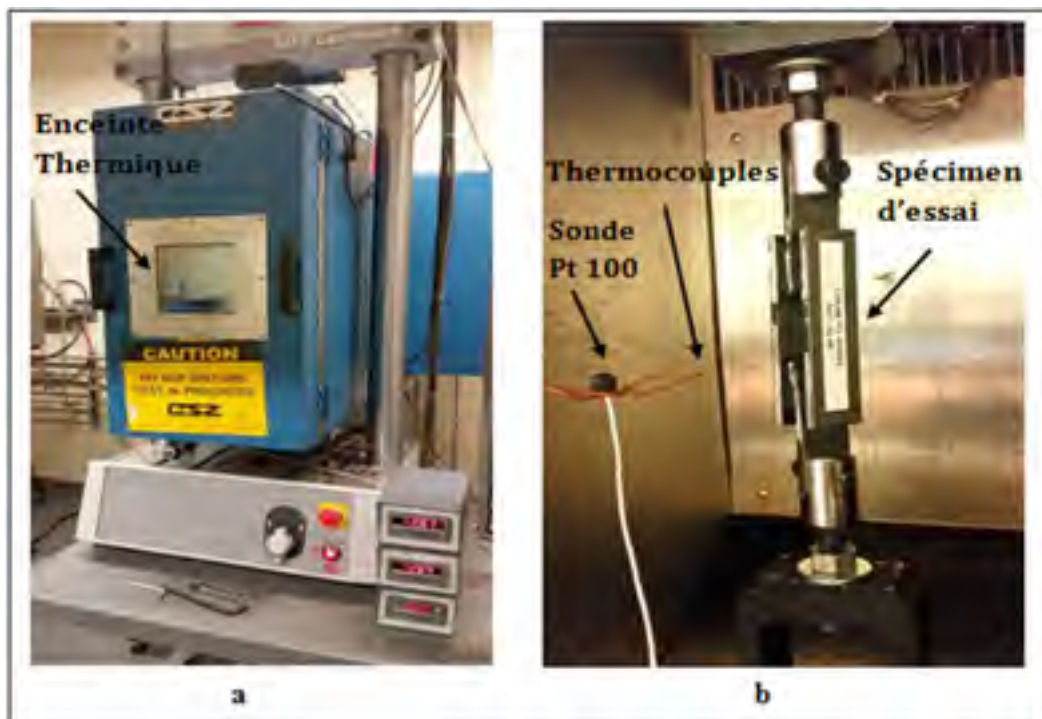


Figure 2.7 Montage expérimental : presse MTS équipée d'une enceinte thermique
a) vue extérieure, b) vue intérieure avec spécimen et thermocouples installés



Figure 2.8 Conditionnement des spécimens dans la chambre réfrigérée

2.6 Procédure des essais

Le conditionnement des spécimens à basse température a été effectué soit dans l'enceinte thermique de la presse soit dans la chambre réfrigérée. Pour les essais nécessitant des courtes durées d'exposition (15 min à 24 h), le conditionnement a été effectué à l'intérieur de l'enceinte thermique. Après mise à température cible de l'enceinte thermique, le spécimen est installé sur presse et laissé refroidir pendant la durée de conditionnement puis testé. Pendant l'installation d'un spécimen dans l'enceinte, la température de celle-ci remonte. Lorsque la porte de l'enceinte est refermée après installation, la température de l'enceinte baisse vers la température cible. Dès lors, la durée de conditionnement est mesurée à partir de l'instant où la température enregistrée par les deux thermocouples et le capteur de température à résistance, installés proche du spécimen, atteignent les valeurs cibles. Pour les conditionnements plus longs (3 à 14 jours), les spécimens ont été conditionnés dans la chambre réfrigérée puis installés et testés directement dans la presse, préalablement conditionnée à la température cible. Le temps nécessaire pour l'installation des spécimens sur presse est moins de 2 minutes. Un intervalle de conditionnement à température ambiante de $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ minimum de 12 heures est laissé entre les essais conduits sur les mêmes spécimens à basse température afin de s'assurer que la température au centre des bocs d'élastomères ait atteint la température ambiante et que les effets du conditionnement précédent à basse température sont éliminés. Cette durée de conditionnement à température ambiante, entre les essais, a été choisie sur la base des résultats des essais effectués par Yakut (2000). Ces essais ont montré qu'une durée de 12 heures est nécessaire pour le réchauffement d'un appui en élastomère refroidi jusqu'à température de -30°C . Les appuis mis à l'essai par Yakut (2000) avaient les dimensions en plans de 229 mm x 356 mm et une épaisseur de 44,5 mm et ont été équipés de thermocouples au centre. Ils ont été d'abord refroidis dans un congélateur de la température ambiante jusqu'à ce qu'ils atteignent la température d'équilibre de -30°C . Ensuite, en éteignant et ouvrant la porte du congélateur, la température des appuis remonte et les données ont été enregistrées jusqu'à l'atteinte de la température ambiante. La Figure 2.9 montre les courbes de réchauffement du congélateur et des appuis en fonction du temps.

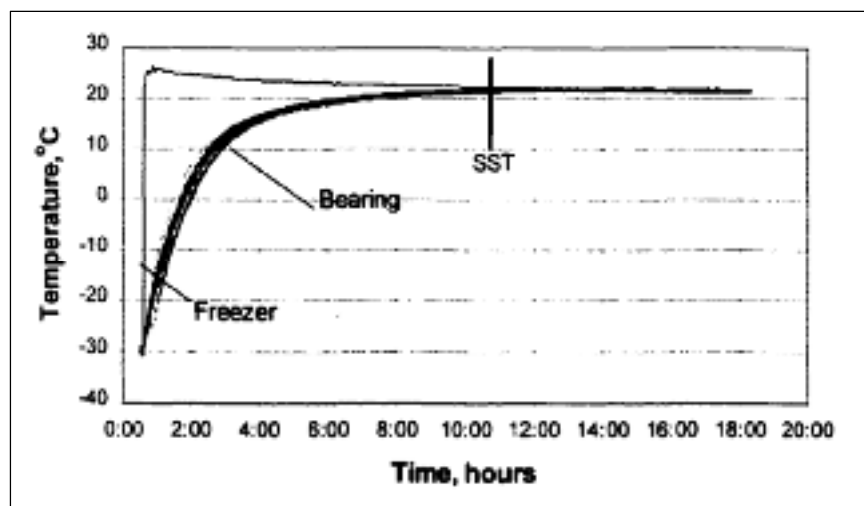


Figure 2.9 Courbe du réchauffement d'appui en élastomère refroidi jusqu'à -30°C
Tirée de Yakut (2000)

Limitations des appareils

Pendant les essais de longues durées de conditionnement, il est arrivé que la température de la chambre réfrigérée soit montée de -30°C à -26°C à cause d'ouverture et fermeture de la porte de la chambre. Suite à cela, les spécimens ont été sortis de la chambre et mis dans l'enceinte thermique de la presse préalablement conditionnée à -30°C . Après réparation de la chambre réfrigérée, les spécimens ont été remis à nouveau dans la chambre pour la suite du conditionnement. Cela a entraîné que tous les spécimens de 14 jours de conditionnement, à savoir les spécimens 7 à 10 du composé NAT55 et 5 à 9 des composés B et E, ont été soumis à une température d'environ -26°C pendant une période de 12 heures, entre le 7^e et le 8^e jour de conditionnement à -30°C . Cet événement n'est arrivé qu'une fois durant toute la durée de conditionnement.

CHAPITRE 3

DESCRIPTION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une description et analyse des résultats des essais effectués selon le programme expérimental décrit au chapitre 2. Pour chaque essai, les courbes en termes de force (F) et déplacement en cisaillement (D) ont été mesurées et enregistrées. Ces courbes ont été ensuite exprimées en termes de contrainte-déformation en cisaillement, respectivement notées τ et γ . Celles-ci sont déduites des forces (F) et déplacements (D) en cisaillement par les équations (3.1) et (3.2), respectivement. La Figure 3.1 présente le schéma d'un spécimen à l'état déformé.

$$\tau = F/2A \quad (3.1)$$

$$\gamma = \frac{D/2}{t_r} \quad (3.2)$$

Où, A et t_r sont, respectivement, la section transversale cisailée et l'épaisseur d'un seul bloc de caoutchouc.

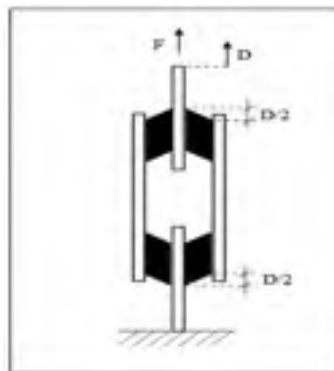


Figure 3.1 Spécimen d'essai à l'état déformé

En se basant sur les courbes contrainte-déformation obtenues, les caractéristiques mécaniques décrivant le comportement hystérétique de ces élastomères, illustrés typiquement sur la figure 3.2, à savoir le module de cisaillement effectif (G_{eff}), l'amortissement visqueux équivalent (ξ_{eq}) et la contrainte de cisaillement à déformation nulle (τ_0) ont été calculés. Ces caractéristiques mécaniques sont déterminées pour les différentes températures d'exposition et durées de conditionnement en se référant au troisième cycle de charge pour chaque amplitude de déformation appliquée. La valeur moyenne de ces propriétés est prise en compte pour les cas de spécimens dupliqués. On observant les courbes d'hystérésis, il est constaté que les contraintes en cisaillement maximale (τ_{max}) et minimale (τ_{min}) ont lieu pratiquement aux déformations en cisaillement maximale (γ_{max}) et minimale (γ_{min}), respectivement. La valeur de G_{eff} est déterminée à partir de l'équation (3.3), comme suit (Constantinou et al., 2007) :

$$G_{\text{eff}} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (3.3)$$

Où, τ_{max} et τ_{min} sont les valeurs des contraintes en cisaillement maximale et minimale, respectivement, et γ_{max} et γ_{min} sont les valeurs des déformations maximale et minimale, respectivement.

Le taux d'amortissement équivalent (ξ_{eq}) est calculé par l'équation (3.4), où A et t_r sont, respectivement, la section transversale et l'épaisseur d'un bloc de caoutchouc et E_C représente la surface délimitée par la relation contrainte-déformation pour le cycle donné (Constantinou et al., 2007). Cette surface a été calculée numériquement. Finalement, la contrainte τ_0 correspond au point d'intersection de la contrainte de cisaillement avec la déformation cyclique égale à zéro (D. Cardone & Gesualdi, 2012).

$$\xi_{eq} = \frac{E_C}{4 \pi G_{\text{eff}} A t_r \gamma^2} \quad (3.4)$$

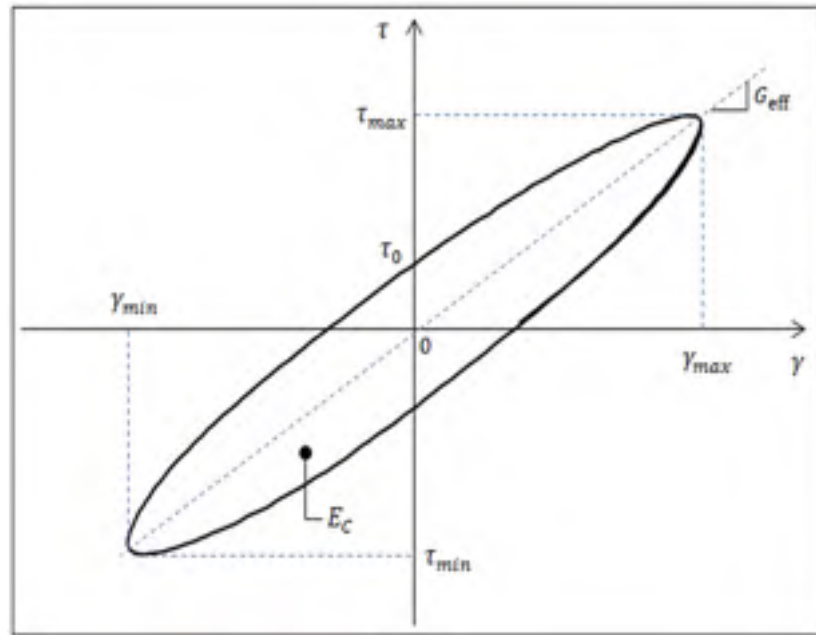


Figure 3.2 Détermination des caractéristiques mécaniques des élastomères

3.2 Caoutchouc naturel à faible amortissement, composé NAT55

3.2.1 Courbes d'hystérésis

Les courbes d'hystérésis du composé NAT55 testé à -8°C et -30°C pour les différentes durées de conditionnement sont montrées par les figures 3.3 et 3.4, respectivement. La Figure 3.3 contient aussi la courbe d'hystérésis des essais effectués à 20°C pour des fins de comparaison. Les résultats des spécimens testés à -8°C montrent une augmentation du niveau de contrainte maximale et de l'aire des boucles d'hystérésis par rapport au spécimen testé à 20°C . Par exemple, comparativement à 20°C la contrainte maximale augmente d'environ 11% après 15 min de conditionnement à -8°C pour une déformation de 100%. Il est constaté aussi qu'il n'y pas de différence notable du comportement mécanique de l'élastomère quand la durée de conditionnement augmente de 15 min à 14 j (augmentations de la contrainte maximale à 100% d'amplitude de déformation d'environ 2%). Concernant les tests réalisés à -30°C , les résultats indiquent que l'aire des boucles d'hystérésis et niveaux de contraintes maximales sont plus importants que ceux obtenus à 20°C . Comme exemple, à 100% de déformation et une durée de conditionnement de 15 min à -30°C , le niveau de contrainte

maximale augmente d'environ de 35% par rapport à température de 20°C. Il est observé aussi que très peu de différence existe entre les courbes d'hystérésis quand la durée de conditionnement augmente de 15 min à 24 h. Après 24 h, une augmentation de l'aire des boucles d'hystérésis et du niveau de contrainte maximale est observée jusqu'à 14 j de conditionnement. Comme exemple, à amplitude de déformation de 100%, la contrainte maximale augmente d'environ 9% quand la durée de conditionnement augmente de 24 h à 3 j, d'environ 10% quand elle augmente de 3 j à 7 j et d'environ 27% quand elle augmente de 7 j à 14 j.

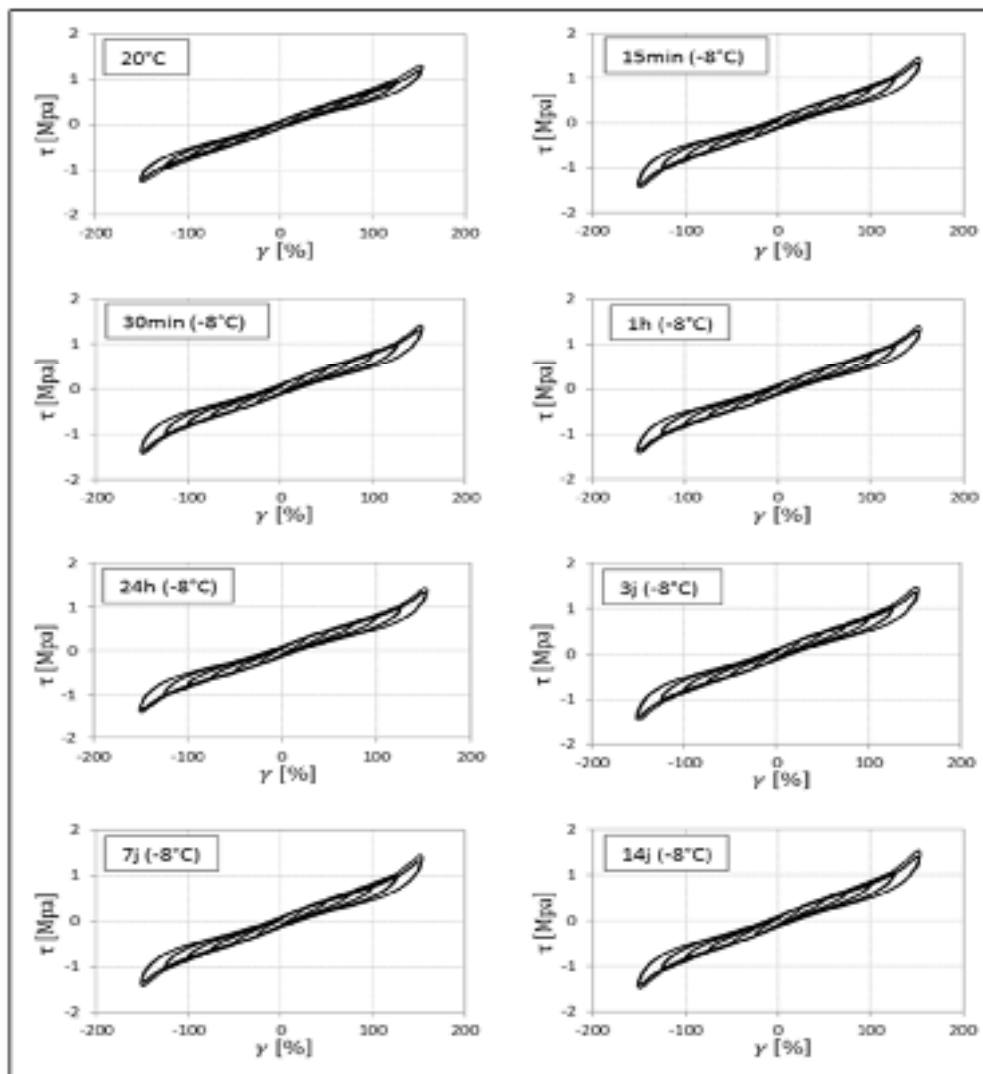


Figure 3.3 Courbes d'hystérésis du composé NAT55 à 20°C et à -8°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j

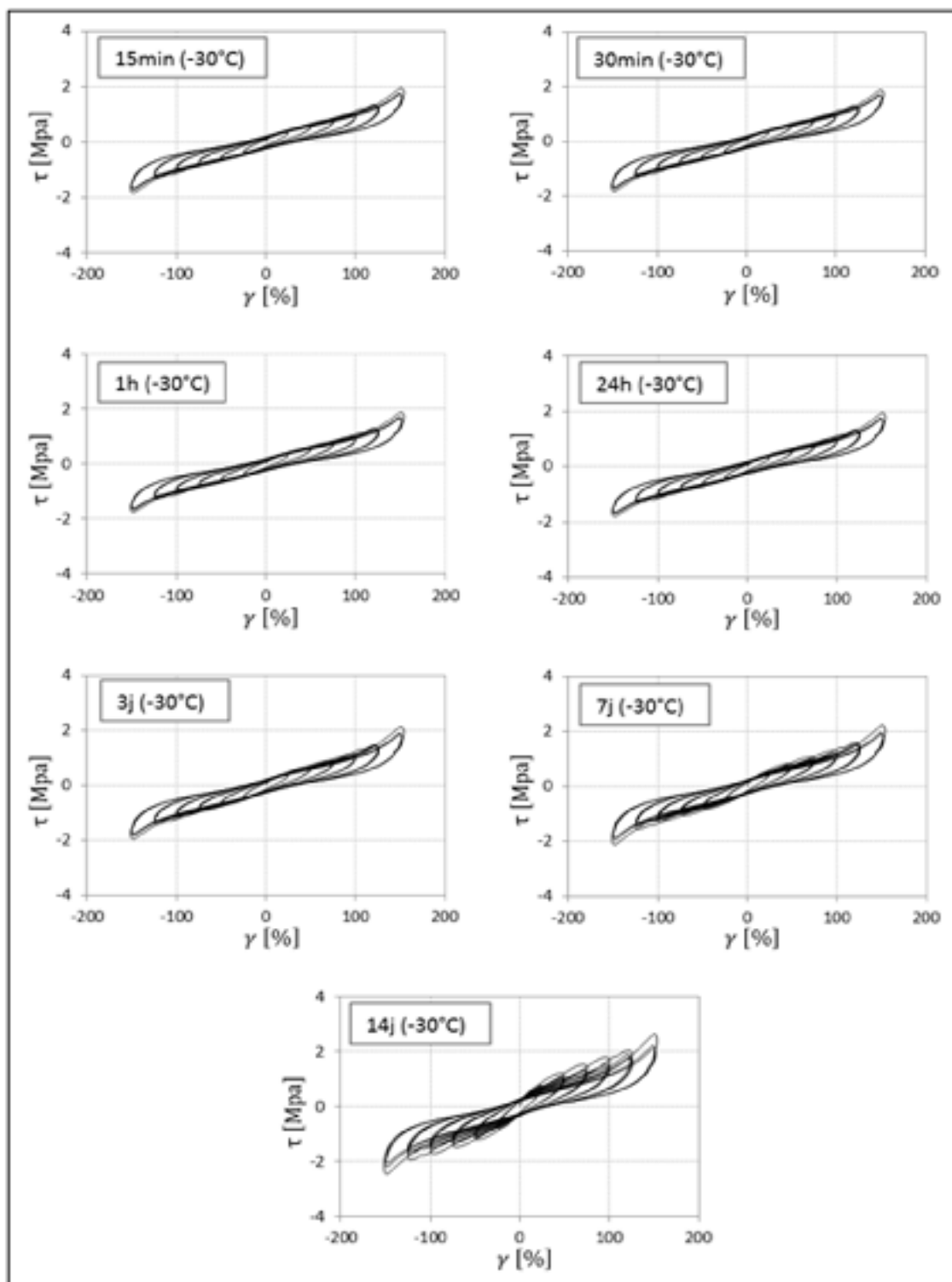


Figure 3.4 Courbes d'hystérésis du composé NAT55 à 20°C et à -30°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j

Afin d'avoir une meilleure appréciation de l'effet des basses températures, une superposition des courbes d'hystérésis, correspondant au troisième cycle de charge pour chaque amplitude de déformation, est effectuée. La Figure 3.5 montre la superposition des courbes d'hystérésis obtenues à 20°C et à -8°C après les durées de conditionnement de 15 min et de 14 j. Les résultats montrent clairement une rigidification instantanée après 15 min de conditionnement, suivie d'une très faible variation à 14 j de conditionnement indiquant l'absence de la cristallisation. La Figure 3.6 montre la superposition des courbes d'hystérésis obtenues à température de -30°C après les durées de conditionnement de 15 min et de 14 j. Les résultats montrent une augmentation du niveau de contrainte maximale et de l'aire des boucles d'hystérésis quand la durée de conditionnement augmente de 15 min à 14 j. Par exemple, à amplitude de 100%, de déformation la contrainte maximale augmente d'environ 51%. Ceci indique la présence du phénomène de cristallisation.

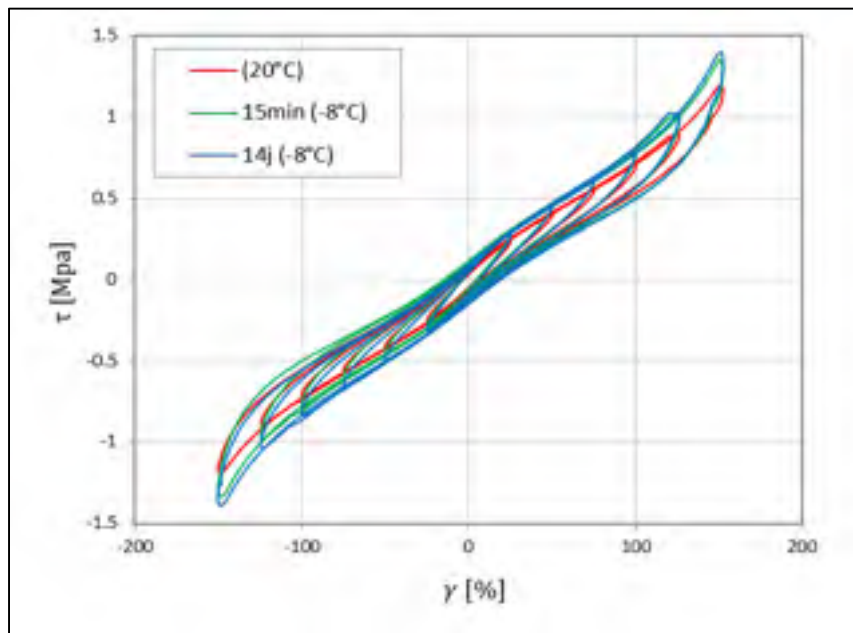


Figure 3.5 Superposition des courbes d'hystérésis du composé NAT55 obtenus à 20°C et à -8°C après 15 min et 14 j de conditionnement

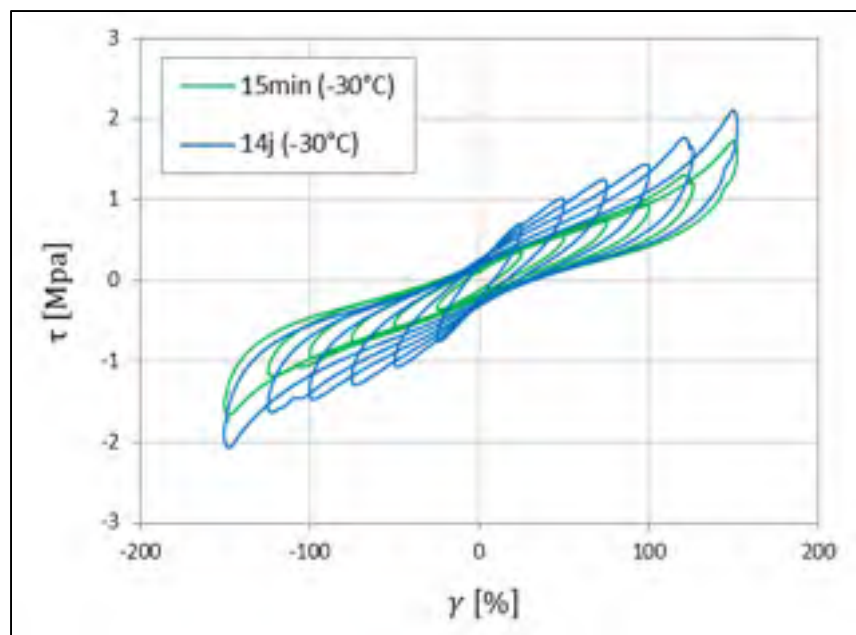


Figure 3.6 Superposition des courbes d'hystérésis du composé NAT55 obtenus à -30°C après 15 min et 14 j de conditionnement

Les Figures 3.7 et 3.8 montrent, respectivement, la superposition des courbes hystérésis des trois cycles de charge des spécimens testés directement à 150% de déformation après 14 j d'exposition à -8°C et -30°C, avec ceux soumis au chargement incrémental (de 25 à 150%) correspondant au même niveau de déformation et durée de conditionnement. Pour les tests à -8°C, il peut être constaté que les niveaux de contraintes maximales du spécimen soumis directement à un niveau de déformation de 150% sont plus importants par rapport à celui soumis au chargement incrémental. Cette différence est plus accentuée au premier cycle de charge par rapport au deuxième et troisième cycle (une différence d'environ 4,5% au premier cycle de charge). Le même constat est observé aux essais réalisés à -30°C, mais avec des proportions plus élevées. Soit un écart approximatif entre les contraintes maximales de 30% au premier cycle, de 12% au deuxième cycle et de 9% au troisième cycle. Cette différence de contrainte peut être attribuée au réchauffement interne, due à la dissipation d'énergie par hystérésis, de l'élastomère subissant les mouvements cycliques incrémentaux (de 25 à 150%). Ce réchauffement est plus importants à la température de -30°C qu'à la température de -8°C, étant donné que l'aire à l'intérieur des courbes d'hystérésis à -30°C est plus élevée et englobent donc plus d'énergie dissipée. Cela a été également confirmé par les figures 2.5

et 2.6 du chapitre 2, qui montrent l'augmentation de la température interne de l'élastomère durant le chargement cyclique incrémentale des essais effectués aux températures de -8°C et de -30°C . Il est à noter que ces résultats concordent avec les résultats des études expérimentales antérieures, notamment celles effectuées par Donatello Cardone, Gesualdi, et Nigro (2011), lesquelles indiquent un réchauffement interne plus important à mesure que la température du test est plus basse.

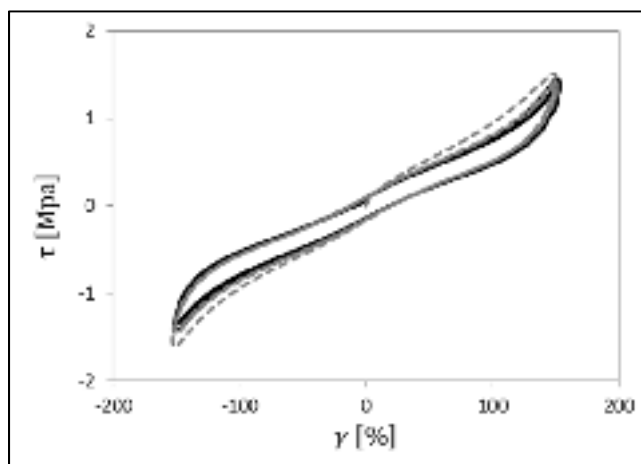


Figure 3.7 Superpositions des courbes d'hystérésis du spécimen (gris) soumis directement à 150% de déformation et le spécimen (noire) soumis au chargement incrémental d'essais effectués à -8°C

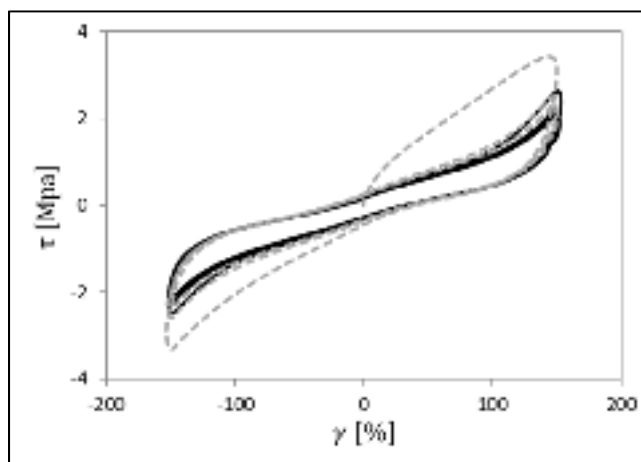


Figure 3.8 Superpositions des courbes d'hystérésis du spécimen (gris) soumis directement à 150% de déformation et le spécimen (noire) soumis au chargement incrémental d'essais effectués à -30°C

3.2.2 Influence du nombre de cycles de chargement

Lors du changement cyclique répété au même niveau de déformation, on constate une diminution du niveau de contrainte maximale atteinte avec le nombre de cycles. Ceci entraîne une diminution de la valeur du module de cisaillement effectif (G_{eff}) calculé au premier et au troisième cycle de chargement. Le Tableau 3.1 montre les rapports des modules de cisaillement effectifs, du composé NAT55, calculés au premier ($G_{eff}(1)$) et au troisième cycle de charge ($G_{eff}(3)$) à 20°C et à basses températures (-8°C et -30°C) après 14 j de conditionnement. On note que le rapport augmente avec la diminution de la température. Celui-ci est de l'ordre de 1,03 à 1,08 pour la température de -8°C et de l'ordre de 1,09 à 1,21 pour la température de -30°C. Ceci indique que plus la température de l'essai est basse plus l'effet du nombre de cycles est important. Cela peut être expliqué par l'augmentation de la température interne du matériau lors du chargement cyclique répété due à l'énergie dissipée par hystérésis, et qui est plus importante à mesure que la température de l'essai est plus basse. Ces résultats concordent avec les études expérimentales conduites par Donatello Cardone et al. (2011) montrant que l'augmentation de la température interne d'un élastomère, pendant un chargement cyclique répété, est plus importante à mesure que la température de l'essai est plus basse.

Tableau 3.1 Effets du nombre de cycles de charge et la température sur le module de cisaillement effectif pour le composé NAT55

Déformation (%)	Température (°C)	$G_{\text{eff}}(1)$ (MPa)	$G_{\text{eff}}(3)$ (MPa)	$\frac{G_{\text{eff}}(1)}{G_{\text{eff}}(3)}$
25	20	1.09	1.06	1.02
50		0.90	0.88	1.02
75		0.82	0.80	1.02
100		0.80	0.77	1.02
125		0.80	0.76	1.02
150		0.86	0.80	1.04
25	-8	1.23	1.19	1.03
50		1.00	0.96	1.04
75		0.90	0.86	1.05
100		0.86	0.82	1.05
125		0.86	0.82	1.05
150		0.98	0.91	1.08
25	-30	3.09	2.84	1.09
50		2.35	2.05	1.15
75		1.98	1.68	1.18
100		1.74	1.45	1.20
125		1.58	1.37	1.15
150		1.68	1.39	1.21

3.2.3 Effet de la durée de conditionnement et du niveau de déformation sur les caractéristiques mécaniques

Les Figures 3.9(a) et 3.10(a) montrent, respectivement, la variation de G_{eff} du composé NAT55 en fonction du niveau de déformation aux températures de -8°C et de -30°C pour les différentes durées de conditionnement. Dans les essais réalisés à -8°C , il est constaté que pour les durées de conditionnement allant de 15 min à 24 h le module de cisaillement effectif (G_{eff}) est pratiquement inchangé pour les différents niveaux de déformation considérés. Entre 24 h et 3 j de conditionnement, on observe une légère augmentation de G_{eff} (3% en moyenne). Pour des durées plus longues, G_{eff} reste à nouveau presque inchangé jusqu'à 14 j de conditionnement. Les résultats indiquent aussi que G_{eff} diminue avec l'augmentation du niveau de déformation. Cette diminution est plus importante pour les faibles amplitudes de déformation de 25 à 75% (une diminution de l'ordre de 12 à 24%) comparée aux grandes déformations de 100 à 125% une diminution de l'ordre de 1 à 5%). Finalement, une légère

rigidification du matériau est observée à la déformation de 150%. Celle-ci, est probablement due à la rigidification de l'élastomère à grande déformation, comme rapporté dans les études précédentes (Clark et al., 1997; Kikuchi & Aiken, 1997). Dans le cas d'essais réalisés à -30°C , les résultats indiquent une variation minimale de G_{eff} entre 15 min et 24 h de conditionnement. À mesure que la durée de conditionnement augmente de 24 h à 14 j, G_{eff} augmente graduellement. Par exemple, à 100% de déformation G_{eff} augmente d'environ 1% entre 15 min et 24 h, de 10% entre 24 h et 3 j et de 40% entre 3 et 14 j. Il est observé aussi que, similairement aux résultats obtenus à -8°C , G_{eff} diminue avec l'augmentation du niveau de déformation, et qui est plus important à faible déformation qu'à grande déformation.

Les Figures 3.9(b) et 3.10(b) présentent, respectivement, la variation de ξ_{eq} en fonction du niveau de déformation aux températures de -8°C et de -30°C , pour les différentes durées de conditionnement. Pour les essais effectués à -8°C , les résultats montrent une très faible sensibilité de l'amortissement visqueux équivalent avec la durée de conditionnement. Les résultats indiquent aussi que ξ_{eq} décroît plus aux moins linéairement quand le niveau de déformation augmente de 25 à 150%. Quant aux essais effectués à -30°C , les résultats montrent le même constat qu'à -8°C , c'est-à-dire que ξ_{eq} varie faiblement avec la durée de conditionnement. Il est constaté aussi une diminution de ξ_{eq} pour la durée de conditionnement de 14 j. Ceci s'explique par le fait que l'élastomère montre une importante rigidification entraînant une augmentation importante de son module de cisaillement effectif. Dès lors, le taux d'amortissement équivalent, calculé selon l'équation (3.4), diminue malgré une augmentation de l'énergie dissipée par cycle qui est moins importante que l'augmentation du module de cisaillement effectif.

Les Figures 3.9(c) et 3.10(c) présentent, respectivement, la variation de la contrainte τ_0 aux températures de -8°C et de -30°C en fonction du niveau de déformation pour les différentes durées de conditionnements. Dans le cas d'essais à -8°C , les résultats indiquent de faibles changements de τ_0 avec la durée de conditionnement. Il est constaté aussi que τ_0 augmente avec l'augmentation du niveau de déformation jusqu'à 125%. Cette augmentation est plus importante à des déformations inférieures à 75% (de l'ordre de 20 à 39%) comparée à des

niveaux de déformation de 100% à 125% (environ 3%). Une diminution atypique de τ_0 est observée entre les niveaux de déformation 125% et 150%. Cela est dû probablement au retour à zéro imposé au dernier quart de cycle de chargement d'amplitude 150%. Ce retour à zéro cause une diminution de la vitesse de déformation, et par conséquent du niveau de contrainte τ_0 dû au comportement viscoélastique du matériau élastomère (Ciesielski, 1999). Concernant les tests effectués à -30°C , pour les durées de conditionnement entre 15 min et 24 h, la variation de τ_0 est minime. Avec l'augmentation de la durée de conditionnement, la contrainte τ_0 augmente, soit de 7% entre 24 h et 3 j, de 6% entre 3 et 7 j et de 17% entre 7 et 14 j à amplitude de déformation égale à 100%. Il est constaté aussi que τ_0 augmente avec la déformation jusqu'à 100%, puis diminue aux déformations de 125% et 150%. Cette diminution peut être attribuée d'une part au réchauffement interne de l'élastomère durant le chargement cyclique incrémental et, d'autre part le fait que durant les premières amplitudes de charges, les cristaux formés dans l'élastomère subissent des ruptures entraînant une diminution de la rigidité latérale, et par conséquent le niveau de contrainte nécessaire pour le déformer à plus grandes amplitudes diminue aussi.

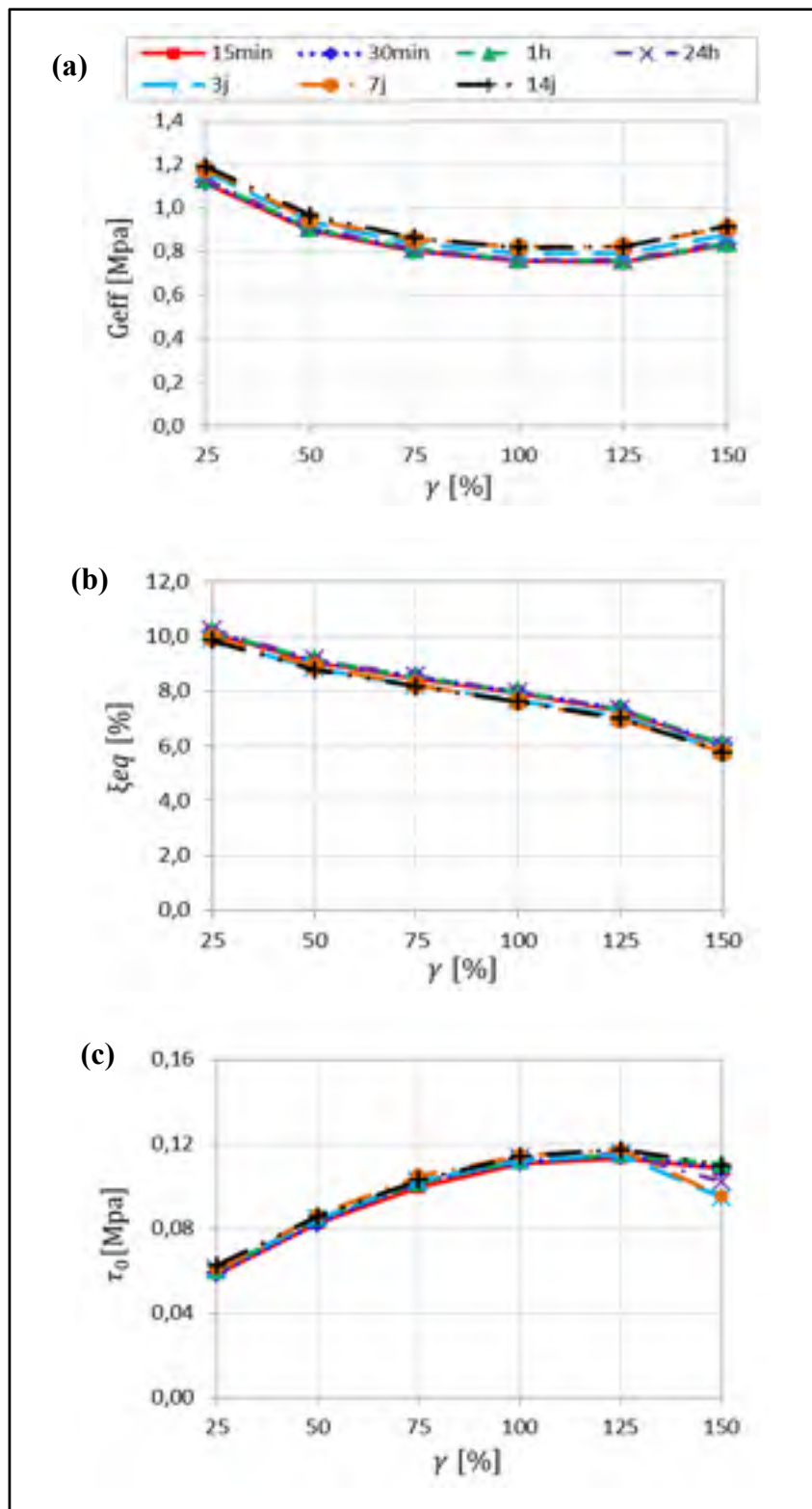


Figure 3.9 Effets de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé NAT55 testé à -8°C

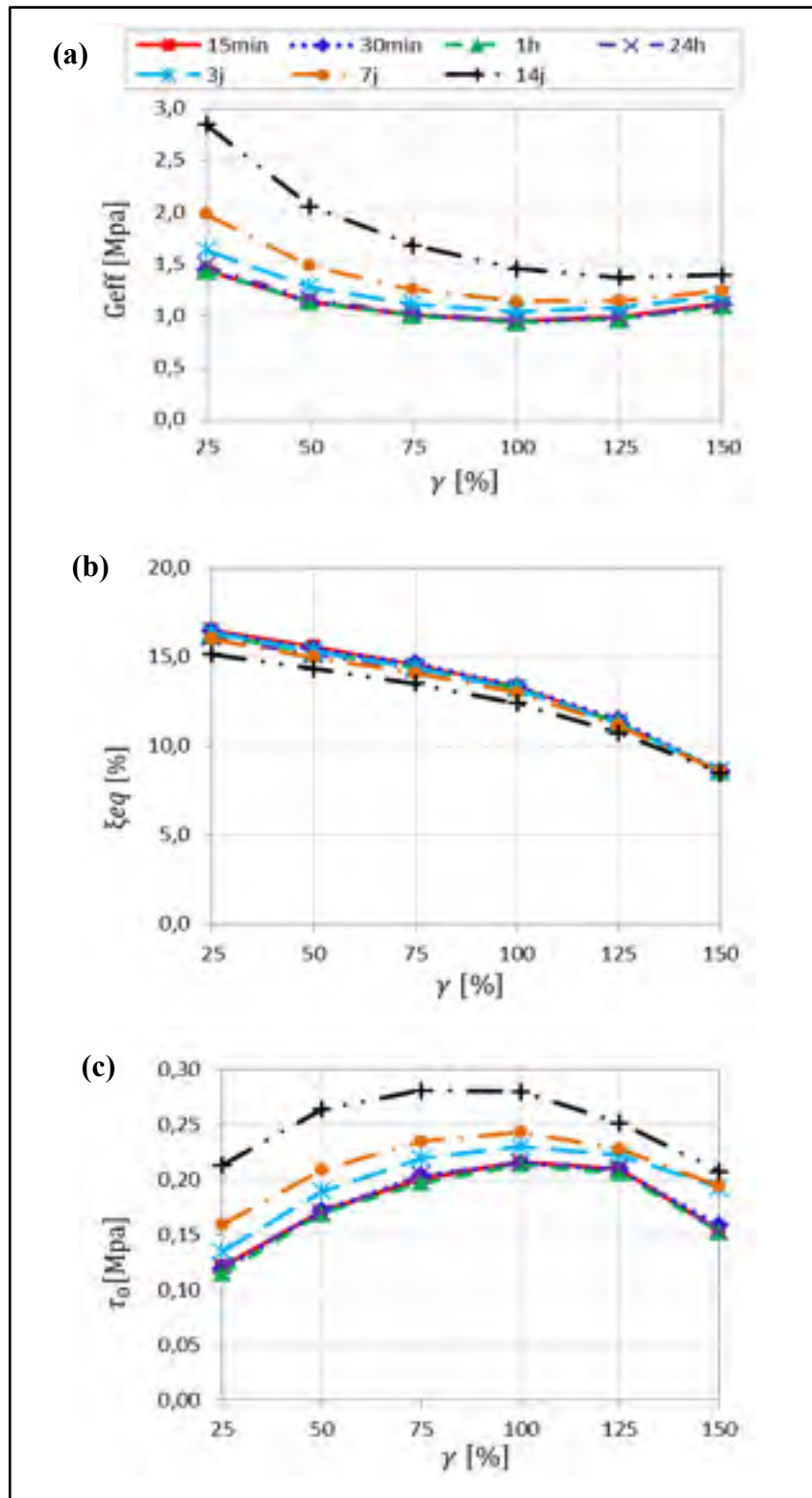


Figure 3.10 Effets de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé NAT55 testé à -30°C

3.2.4 Cristallisation à basse température

Les Figures 3.11(a) et 3.11(b) montrent, respectivement, les courbes de cristallisation du composé NAT55 aux températures de -8°C et de -30°C pour chacune des amplitudes de déformation appliquées. Les valeurs du module de cisaillement effectif calculées à basse température sont normalisées par leurs valeurs correspondantes obtenues à 20°C . Dans ces figures, la durée de conditionnement en heures, est tracée sur une échelle logarithmique afin de mieux visualiser l'évolution du module de cisaillement effectif normalisé en fonction de la durée de conditionnement. Les résultats des essais effectués à -8°C montrent une rigidification du caoutchouc naturel après quelques minutes de conditionnement (15 à 30 min) dû au raidissement thermique instantané. Cette rigidification, varie en amplitude selon le niveau de déformation imposé. Par exemple, après 30 min de conditionnement, le module de cisaillement normalisé atteint approximativement les valeurs de 1,16 et 1,08 pour les déformations de 25% et 100%, respectivement. De 30 min jusqu'à 24 h de conditionnement, le module de cisaillement normalisé reste presque inchangé, s'ensuit une légère augmentation jusqu'à 14 j de conditionnement (le module de cisaillement normalisé égale environ 1,15 à 100% de déformation). Ceci indique que la cristallisation de l'élastomère ne s'est pas produite. Pour les essais réalisés à -30°C , les résultats montrent que l'élastomère se rigidifie instantanément à environ 30 min de conditionnement, indiquant une valeur du module de cisaillement effectif normalisé égale à environ 1,33 pour une déformation de 100%. Entre 30 min et 24 h de conditionnement, le module de cisaillement effectif normalisé reste pratiquement inchangé. À mesure que la durée de conditionnement augmente de 24 h à 14 j, le module de cisaillement effectif normalisé augmente graduellement atteignant les valeurs de 1,47 après 3 j, de 1,61 après 7 j et de 2,05 après 14 j pour une amplitude de déformation de 100%. Ces résultats semblent en concordance avec les résultats rapportés par les études antérieures (Fuller et al., 2004; Russell, 1951; Stevenson, 1983) indiquant que la vitesse maximale de cristallisation du caoutchouc naturel est autour de -25°C , laquelle est proche de -30°C .

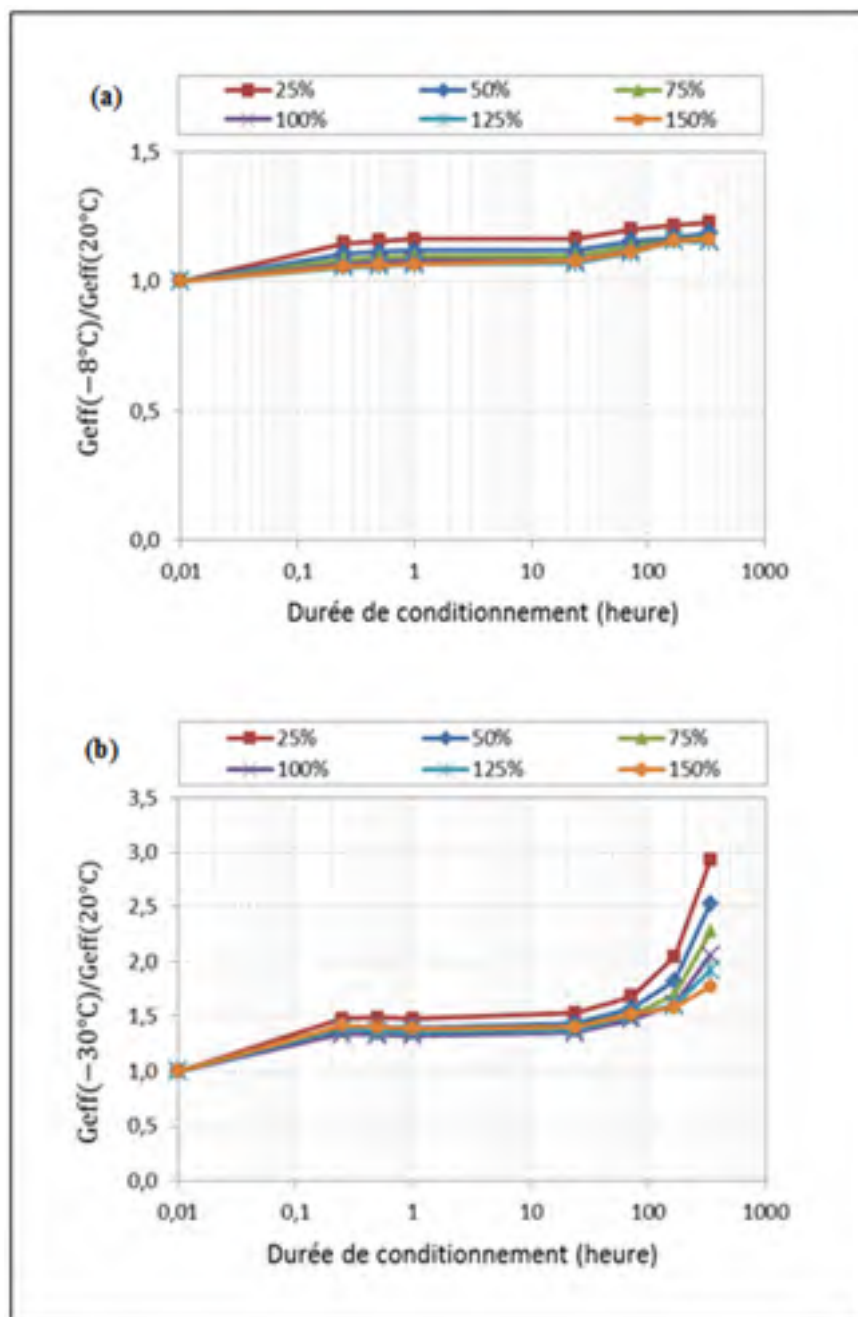


Figure 3.11 Courbes de cristallisation du composé NAT55 pour les différentes amplitudes de déformations appliquées (a) à -8°C et (b) à -30°C

3.3 Caoutchouc naturel à amortissement élevé, composé B

3.3.1 Recouvrement des propriétés

Les Figures 3.12 et 3.13 montrent l'effet du recouvrement des propriétés vierge du composé B après 14 j de conditionnement aux températures de -8°C et de -30°C , respectivement. Ces figures présentent aussi la variation de G_{eff} en fonction du niveau de déformation du même composé obtenu à 20°C pour référence. Les résultats montrent que, pour les deux températures de -8°C et de -30°C , les spécimens testés à l'état vierge présentent des modules de cisaillements effectifs supérieurs à ceux testés après avoir été pré-déformés (scragged). Cette différence est, relativement, plus importante à petites amplitudes de déformation (inférieure à 75%) et qui tend à diminuer quand le niveau de déformation augmente (100 à 150%). Par exemple, durant les essais à -8°C , l'écart entre les modules de cisaillements effectifs calculés à l'état vierge et pré-déformé, est d'environ 11% pour une déformation de 25% et d'environ 6% pour une déformation de 100%. Cette différence entre les modules de cisaillement effectif indique que le recouvrement des propriétés de l'élastomère ne s'est pas produit après 14 j de conditionnement, du moins, au complet. En outre, l'effet du recouvrement à lui seul ne peut expliquer les différences plus élevées de G_{eff} entre les essais effectués à température de 20°C et à basses températures, vu que la durée de conditionnement de 14 jours est, relativement, faible. Par exemple, à température de -8°C et 100% d'amplitude de déformation, G_{eff} augmente d'environ 33% en comparant à 20°C , tandis qu'il aurait augmenté d'environ 39% si on considère un recouvrement des propriétés au complet. Cela indique que les plus importants changements dans le comportement mécanique de l'élastomère sont dus à l'effet de la température et non au recouvrement des propriétés.

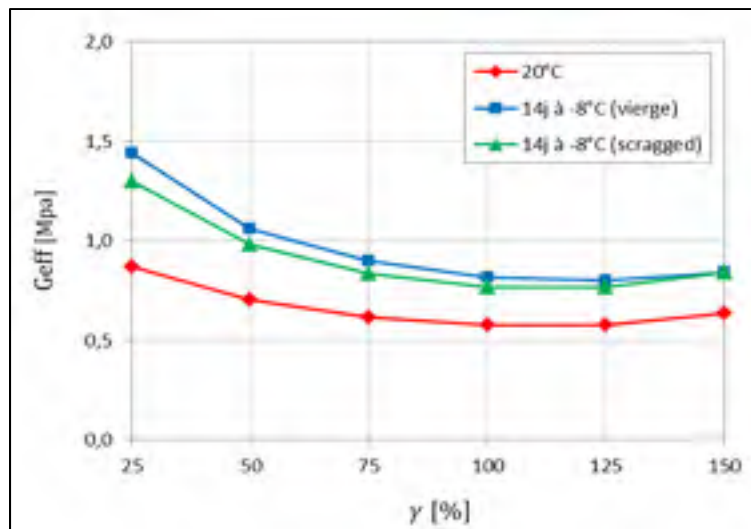


Figure 3.12 Recouvrement des propriétés vierge du composé B après 14 j de conditionnement à -8°C

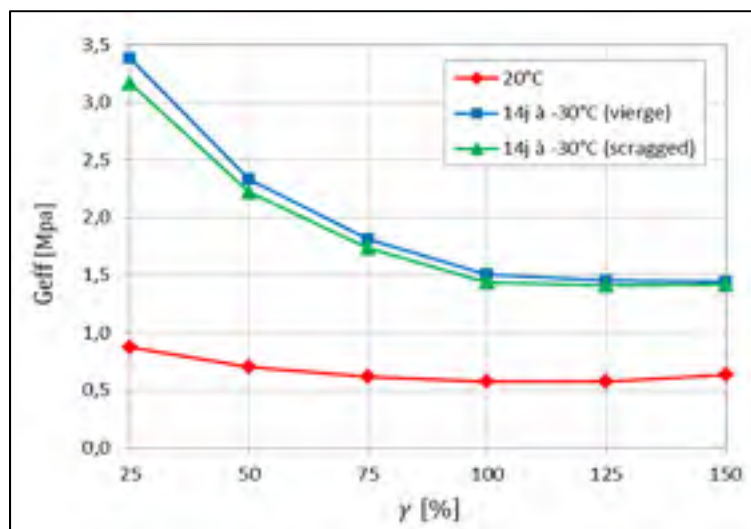


Figure 3.13 Recouvrement des propriétés vierge du composé B après 14 j de conditionnement à -30°C

3.3.2 Courbes d'hystérésis

Les courbes d'hystérésis des spécimens du composé B testés aux températures de -8°C et de -30°C pour chacune des durées de conditionnement sont illustrées par les figures 3.14 et 3.15, respectivement. La Figure 3.14 contient aussi la courbe d'hystérésis des essais effectués à

20°C pour des fins de comparaison. L'analyse des résultats obtenus à -8°C montre une augmentation de l'aire des boucles d'hystérésis et des niveaux de contrainte maximale atteints par rapport à ceux obtenus à 20°C. Cette augmentation est plus importante à petites amplitudes de déformation (25 à 50%) que pour les grandes amplitudes de déformation (100 à 150%). Par exemple, comparativement à 20°C la contrainte maximale augmente, respectivement, d'environ 50% et 32% aux amplitudes de déformation de 25% et de 100% après 24 h de conditionnement à -8°C. Les résultats montrent aussi que les courbes d'hystérésis sont similaires quand la durée de conditionnement augmente de 15 min jusqu'à 14 j. Pour les essais effectués à -30°C, les résultats montrent le même constat qu'à température de -8°C, c'est-à-dire que l'aire des boucles d'hystérésis et des niveaux de contrainte maximale sont plus importants comparativement à ceux obtenus à 20°C, mais avec des proportions plus élevées. Par exemple, en comparant à 20°C la contrainte maximale augmente d'environ 139% après 24 h de conditionnement à -30°C pour un niveau de déformation de 100%. Il est observé aussi qu'entre les durées de conditionnement comprises entre 15 min et 24 h, les courbes d'hystérésis sont pratiquement similaires. Après 24 h de conditionnement, une légère augmentation de l'aire des boucles d'hystérésis et des niveaux de contrainte maximale atteints est constatée jusqu'à 14 j de conditionnement. À titre d'exemple, le niveau de contrainte maximale augmente d'environ 5% quand la durée de conditionnement augmente de 24 h à 14 j pour une amplitude de déformation de 100%.

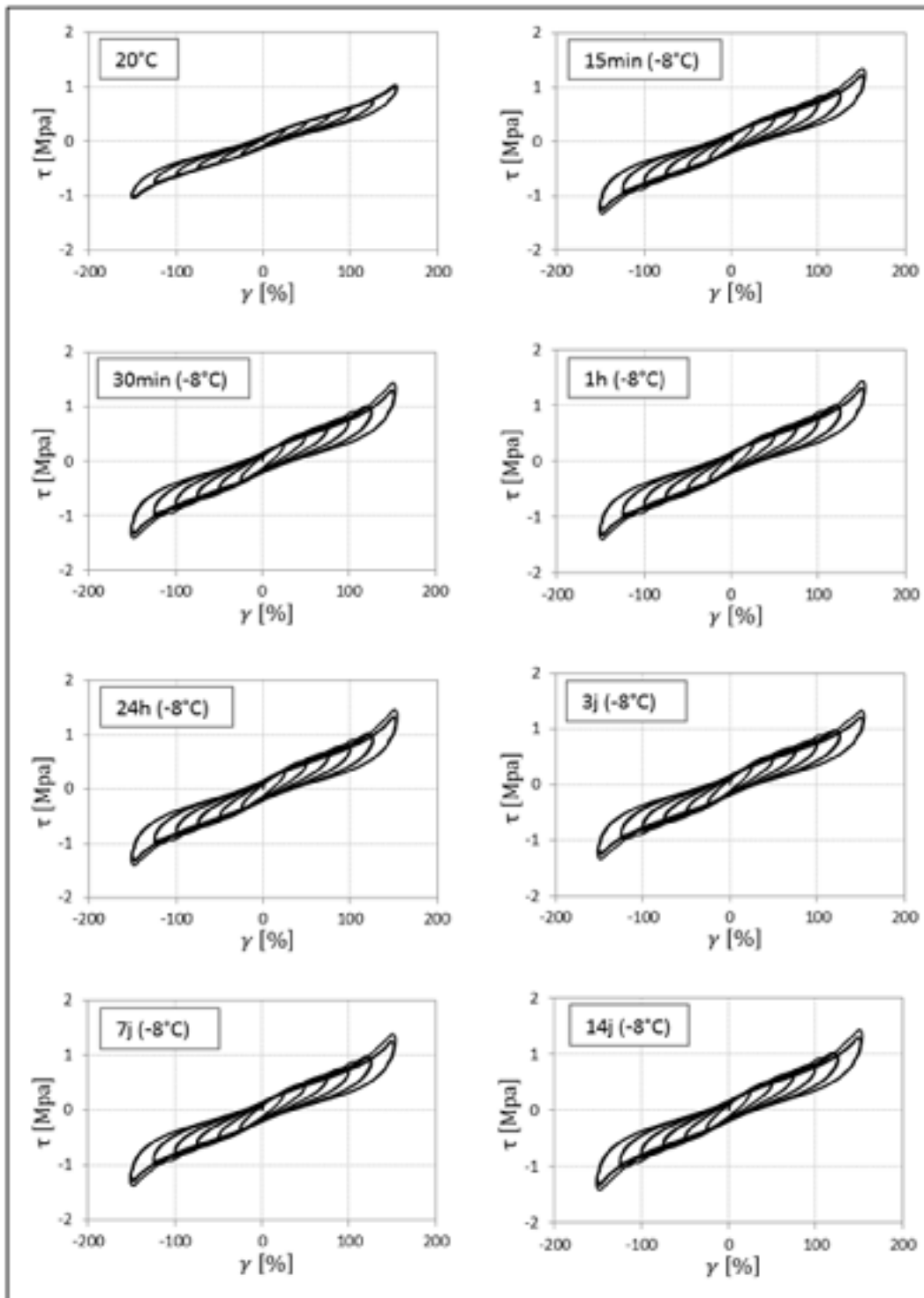


Figure 3.14 Courbes d'hystérésis du composé B à 20°C et à -8°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j

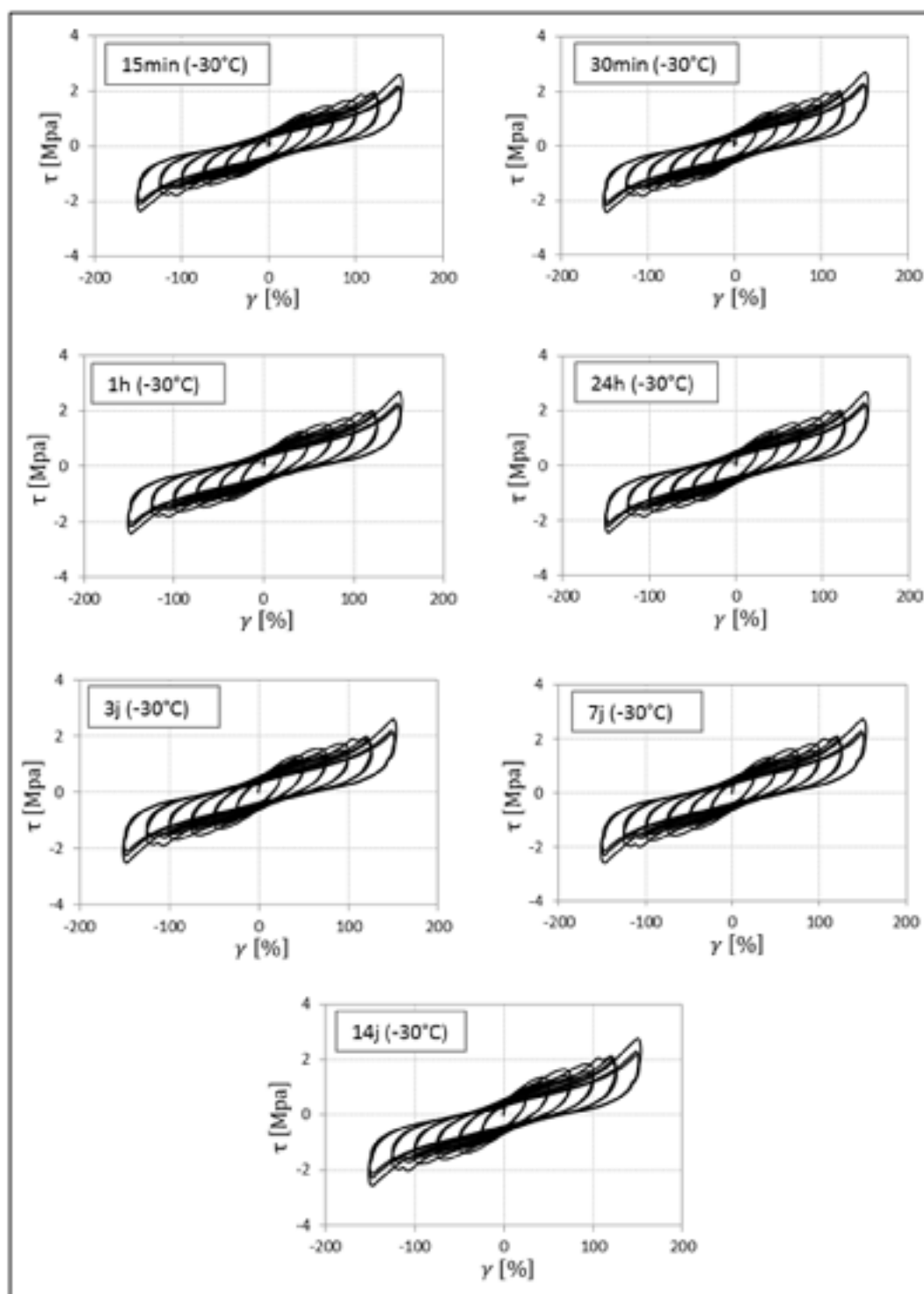


Figure 3.15 Courbes d'hystérésis du composé B à 20°C et à -30°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j

3.3.3 Influence du nombre de cycles de chargement

Le Tableau 3.2 montre les rapports des modules de cisaillement effectif, du composé B, calculés au premier ($G_{\text{eff}}(1)$) et au troisième ($G_{\text{eff}}(3)$) cycle de charge à 20°C et à basses températures de -8°C et de -30°C après 14 j de conditionnement. Autant que pour le composé NAT55, le rapport augmente avec la diminution de la température, mais avec des proportions plus élevées. Dépendamment du niveau de déformation, ce rapport est de l'ordre de 1,06 à 1,10 à température de -8°C et de l'ordre de 1,14 à 1,23 à température de -30°C. Cette différence entre le composé NAT55 et le composé B peut s'expliquer par le fait que les élastomères à haut taux d'amortissement dissipent plus d'énergie par hystérésis et donc plus de chaleur générée par rapport au caoutchouc à faible taux d'amortissement.

Tableau 3.2 Effets du nombre de cycles de charge et la température sur le module de cisaillement effectif pour le composé B

Déformation (%)	Température (°C)	$G_{\text{eff}}(1)$ (MPa)	$G_{\text{eff}}(3)$ (MPa)	$\frac{G_{\text{eff}}(1)}{G_{\text{eff}}(3)}$
25	20	0.89	0.87	1.02
50		0.72	0.70	1.03
75		0.64	0.62	1.03
100		0.59	0.58	1.02
125		0.58	0.57	1.02
150		0.66	0.64	1.03
25	-8	1.38	1.30	1.06
50		1.05	0.98	1.07
75		0.90	0.84	1.07
100		0.82	0.76	1.08
125		0.80	0.77	1.04
150		0.92	0.84	1.10
25	-30	3.60	3.17	1.14
50		2.69	2.22	1.21
75		2.15	1.73	1.24
100		1.79	1.44	1.24
125		1.62	1.41	1.15
150		1.75	1.42	1.23

3.3.4 Effet de la durée de conditionnement et du niveau de déformation sur les caractéristiques mécaniques

Les variations du module de cisaillement effectif (G_{eff}) du composé B en fonction de l'amplitude de déformation pour les différentes durées de conditionnement à -8°C et -30°C sont montrées par les figures 3.16(a) et 3.17(a), respectivement. Les résultats montrent qu'à température de -8°C , la variation de G_{eff} est négligeable avec l'augmentation de la durée de conditionnement de 15 min à 14 j. Il est constaté aussi que G_{eff} diminue avec l'augmentation du niveau de déformation de 25 à 125%, puis remonte légèrement entre 125% et 150% de déformation. Tel que le composé NAT55, cette remontée de G_{eff} est probablement due à la rigidification du matériau à grande déformation. Quant aux spécimens testés à -30°C , une légère augmentation de G_{eff} est observée avec l'augmentation de la durée de conditionnement. Cette augmentation est plus importante à faibles niveaux de déformations (inférieure à 50%) qu'à grandes déformations (100 à 125%). Par exemple, à 25% de déformation G_{eff} augmente d'environ 12% quand la durée de conditionnement augmente de 15 min à 14 j, tandis qu'il augmente de d'environ 6% à déformation de 100% entre les mêmes durées de conditionnement. Il est observé aussi que G_{eff} diminue quand le niveau de déformation augmente de 25 à 100% puis reste pratiquement inchangé entre 100 et 150%.

Les Figures 3.16(b) et 3.17(b) présentent, respectivement, la variation de ξ_{eq} en fonction du niveau de déformation aux températures de -8°C et de -30°C pour les différentes durées de conditionnement considérées. Similairement au composé NAT55, les résultats montrent que ξ_{eq} ne varie pratiquement pas quand la durée de conditionnement augmente de 15 min à 14 j, et ce pour les deux températures d'exposition. Il est constaté aussi que ξ_{eq} diminue presque linéairement avec l'augmentation de l'amplitude de déformation de 25 à 150%.

Les Figures 3.16(c) et 3.17(c) présentent, respectivement, la variation de la contrainte τ_0 aux températures de -8°C et de -30°C en fonction du niveau de déformation pour les différentes durées de conditionnements. Les résultats des spécimens testés à -8°C indiquent de faibles variations de τ_0 avec l'augmentation de la durée de conditionnement de 15 min à 14 j. Il est

constaté aussi que τ_0 augmente quand le niveau de déformation augmente de 25% à 125%. Une diminution atypique de τ_0 entre les amplitudes de déformation de 125% et de 150% est observée. Autant que le composé NAT55, cela est due probablement au retour à zéro imposé au dernier quart de cycle de charge d'amplitude 150%, entraînant une diminution de la vitesse de déformation et donc du niveau de contrainte τ_0 . Quant aux spécimens testés à -30°C, il est constaté que la contrainte τ_0 augmente légèrement avec la durée de conditionnement. Cette augmentation est, relativement, plus importante pour les déformations de faibles amplitudes (25 à 50%) que pour les amplitudes de grandes déformation (100 à 125%). Par exemple, quand la durée de conditionnement augmente de 15 min à 14 j la contrainte τ_0 augmente d'environ 15% à une déformation de 25% et d'environ 5% à une déformation de 100%. Il est constaté aussi que, la contrainte τ_0 augmente quand le niveau de déformation augmente de 25 à 75%, puis diminue entre les niveaux de déformation de 75 à 150%. Cela peut être expliqué par le réchauffement interne du matériau durant le chargement cyclique incrémental causé par les grandes quantités d'énergie dissipée par hystérésis.

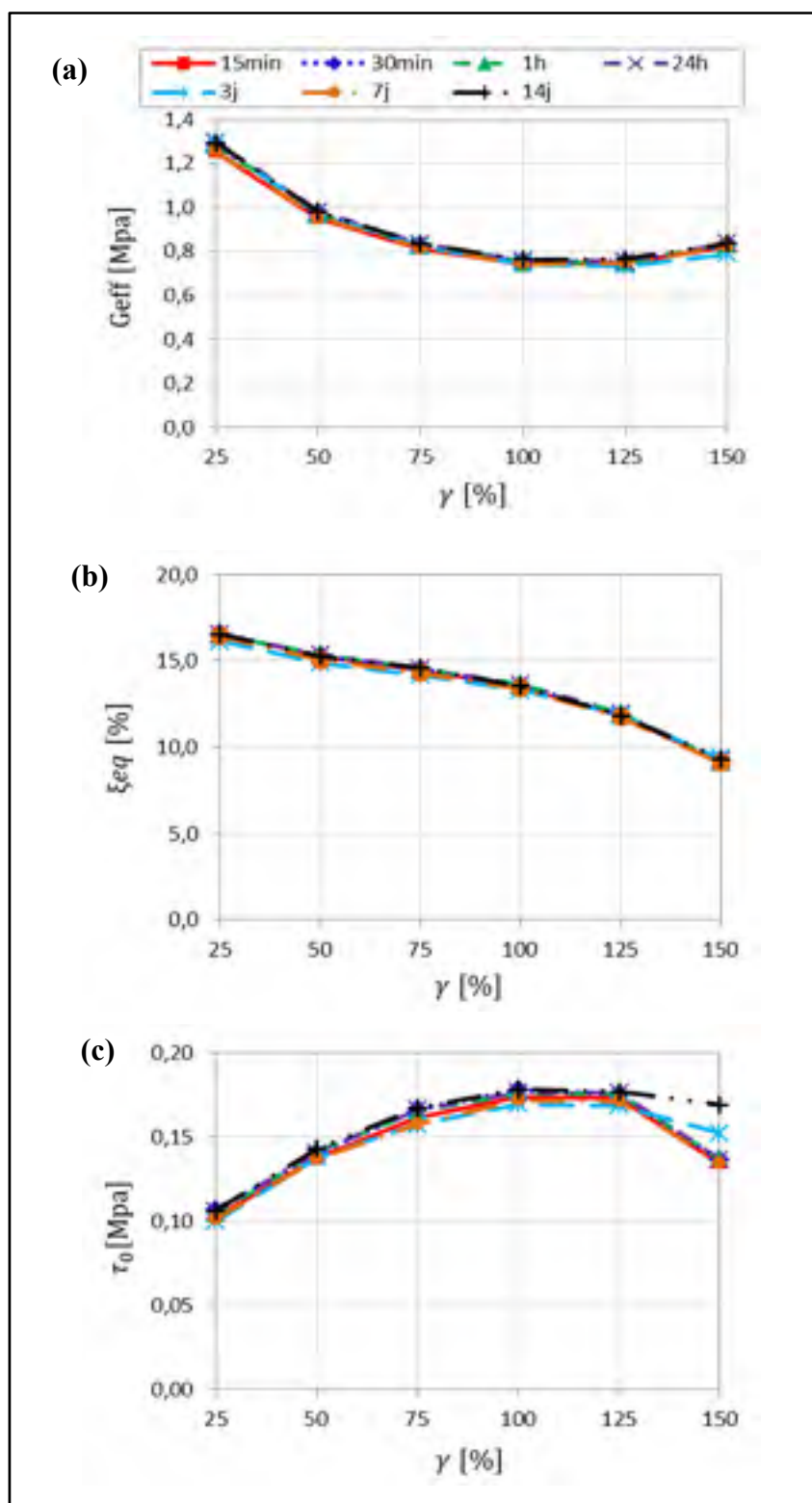


Figure 3.16 Effet de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé B testé à -8°C

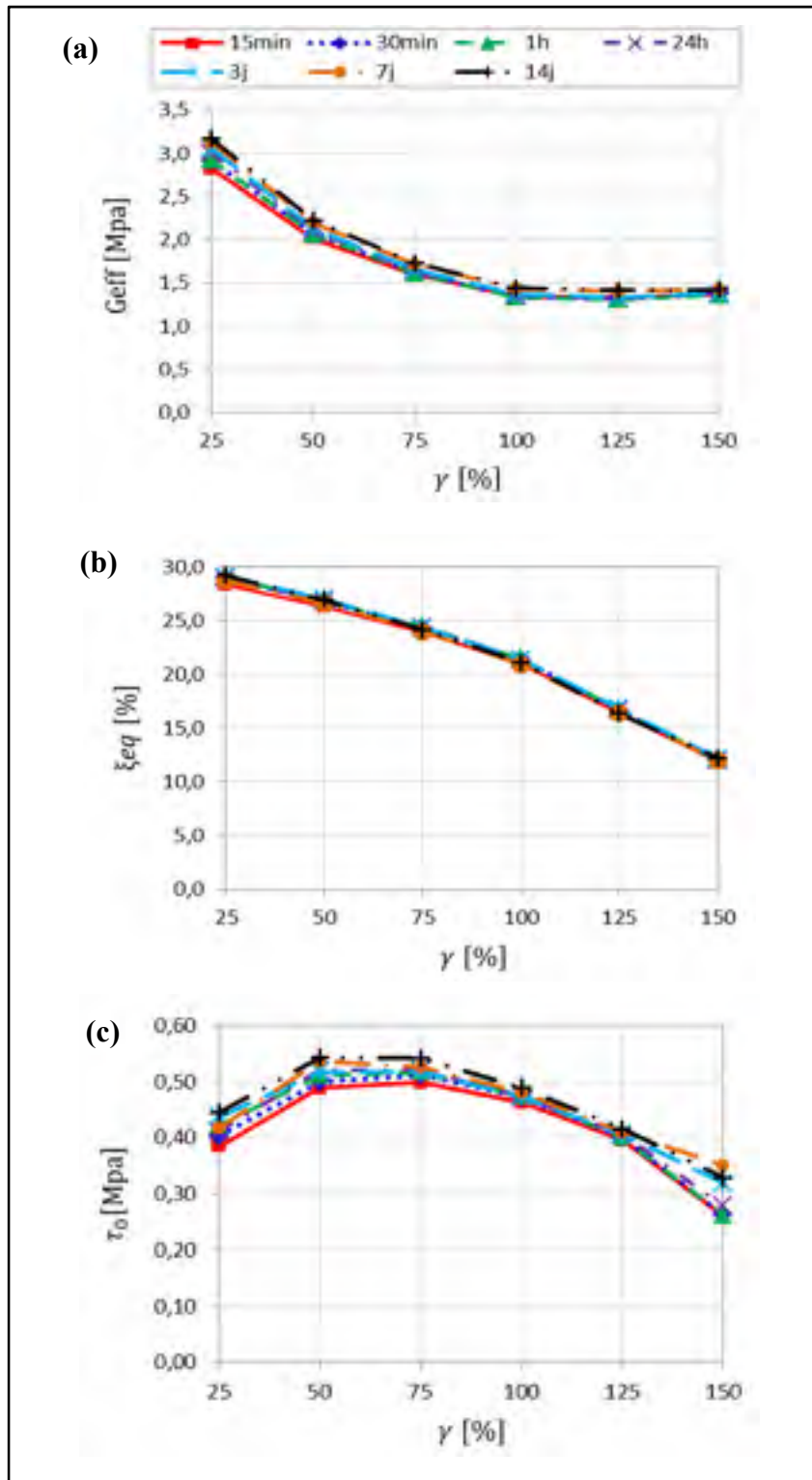


Figure 3.17 Effet de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé B testé à -30°C

3.3.5 Cristallisation à basse température

Les Figures 3.18(a) et 3.18(b) montrent, respectivement, les courbes de cristallisation du composé B aux températures de -8°C et de -30°C pour chacune des amplitudes de déformation appliquées. Durant les essais à -8°C , il est constaté l'atteinte du raidissement thermique instantané en moins d'une heure de conditionnement. Il indique des valeurs du module de cisaillement effectif normalisé comprises entre 1,31 à 1,48 dépendamment du niveau de déformation imposé. Après ce raidissement instantané, les courbes montrent un palier où le module de cisaillement normalisé reste pratiquement inchangé jusqu'à 14 j de conditionnement. Ceci indique, que la cristallisation de l'élastomère ne s'est pas manifestée. Pour les spécimens testés à -30°C , un raidissement thermique instantané plus important est, également, observé en moins d'une heure de conditionnement. Ce raidissement instantané indique que le module de cisaillement effectif normalisé atteint environ les valeurs comprises entre 2,13 et 3,35 dépendamment du niveau de déformation. Entre 1 h et 24 h de conditionnement, le module de cisaillement effectif normalisé reste presque inchangé. Après 24 h, une légère augmentation graduelle du module de cisaillement effectif normalisé est constatée jusqu'à 14 j de conditionnement. Par exemple, le module de cisaillement effectif normalisé augmente de 2,35 après 24 h de conditionnement à 2,37 après 3 j de conditionnement et à 2,50 après 14 j de conditionnement à 100% de déformation. Ceci indique un probable début de cristallisation de l'élastomère. En outre, il est constaté que l'effet de la température est plus important à petites amplitudes de déformation (25 à 50%) que pour les grandes déformations (100 à 150%). À titre d'exemple, le module de cisaillement normalisé atteint les valeurs de 3,63 à 25% de déformation contre 2,50 à 100% de déformation, après 14 j de conditionnement à -30°C .

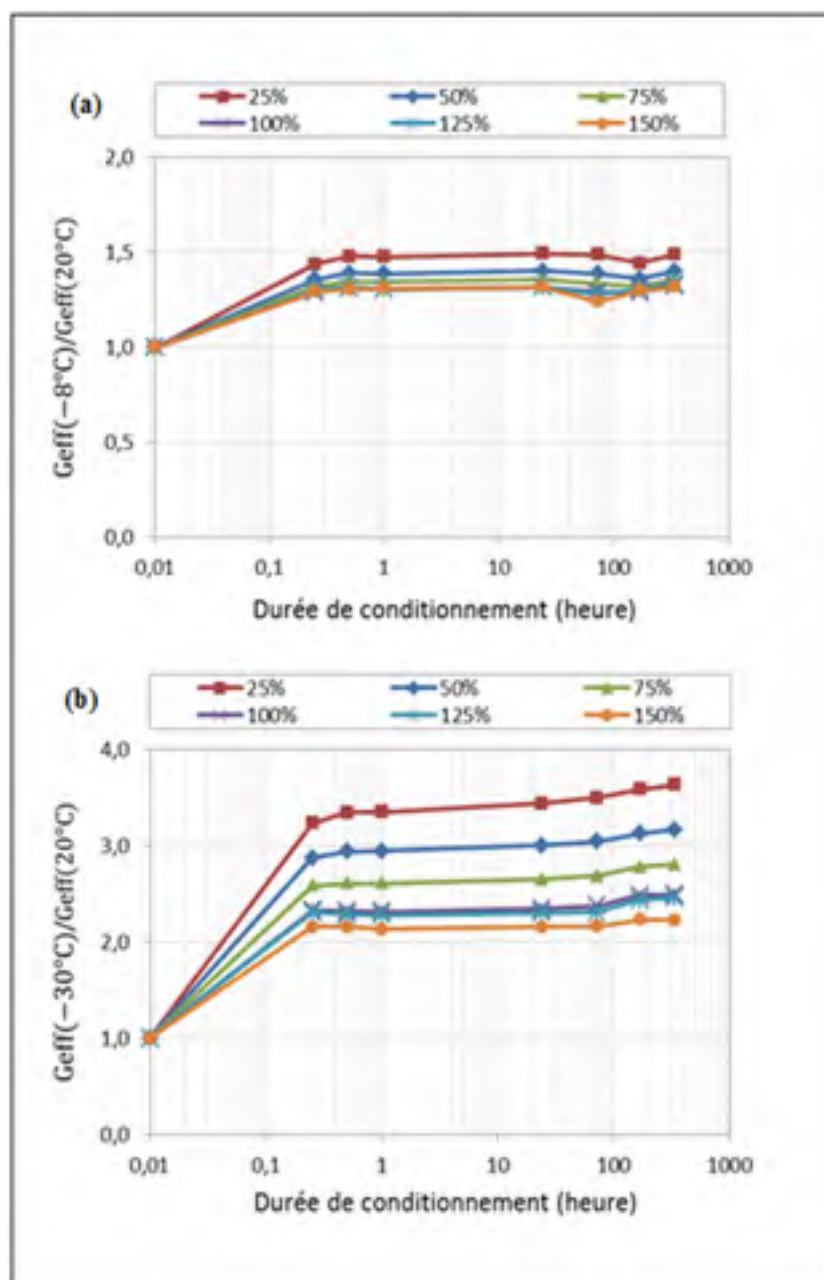


Figure 3.18 Courbes de cristallisation du composé B pour les différentes amplitudes de déformations appliquées (a) à -8°C et (b) à -30°C

3.4 Caoutchouc naturel à amortissement élevé, composé E

3.4.1 Recouvrement des propriétés

Les Figures 3.19 et 3.20 montrent l'effet du recouvrement des propriétés vierge du composé E après 14 j de conditionnement aux températures de -8°C et de -30°C , respectivement. La variation de G_{eff} en fonction du niveau de déformation du même composé obtenu à 20°C est présentée également dans ces figures pour référence. Les résultats montrent les mêmes observations que pour le composé B, c'est-à-dire que les spécimens testés avec leurs propriétés vierges présentent des modules de cisaillements effectifs plus importants que ceux testés avec les propriétés pré-déformées (scragged). Par exemple, à 100% de déformation G_{eff} présente des écarts d'environ 20% et 6% entre les spécimens testés à l'état vierge et pré-déformé aux températures de -8°C et de -30°C , respectivement. Cela indique que l'effet du recouvrement pour une durée de 14 j de conditionnement à température cible est isolé, du moins, partiellement. De plus, l'effet du recouvrement est moins important par rapport à l'effet des basses températures, vu que la durée de conditionnement (14 jours) est relativement faible. Par exemple, à température de -30°C et à 100% de déformation G_{eff} augmente d'environ 163% comparativement à 20°C , alors qu'il aurait augmenté d'environ 179% si on considère un recouvrement des propriétés au complet. La comparaison montre que l'effet des basses températures est de loin plus important que l'effet du recouvrement.

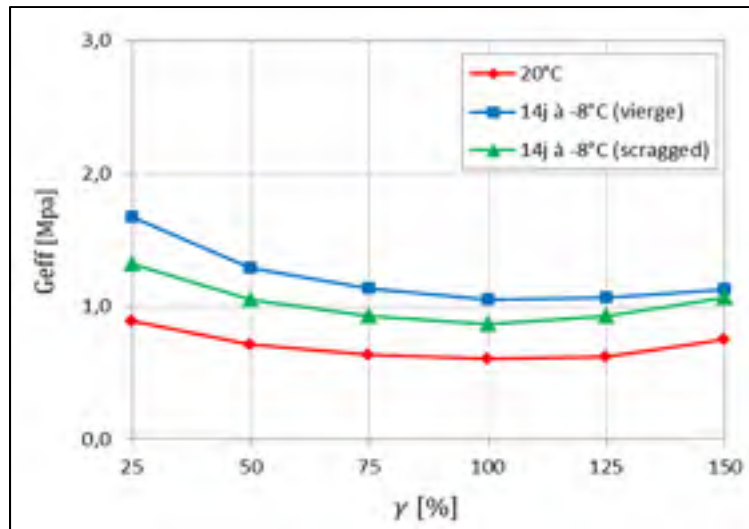


Figure 3.19 Recouvrement des propriétés vierge du composé E après 14 j de conditionnement à température de -8°C

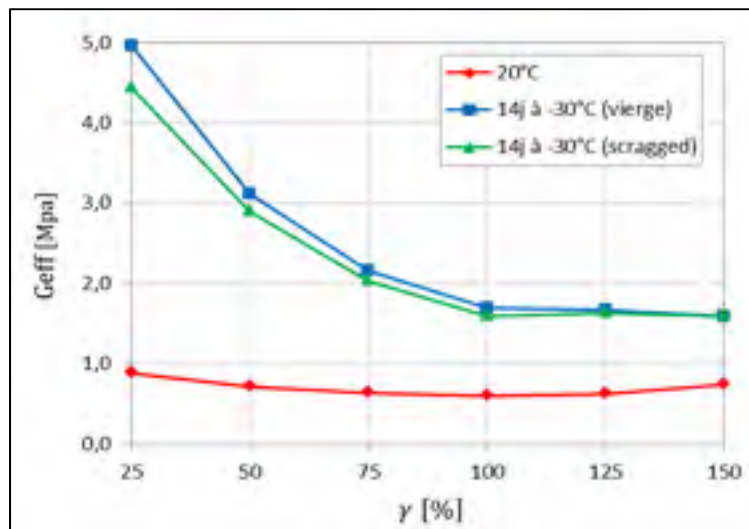


Figure 3.20 Recouvrement des propriétés vierge du composé E après 14 j de conditionnement à température de -30°C

3.4.2 Courbes d'hystérésis

Les courbes d'hystérésis des spécimens du composé E testés aux températures de -8°C et de -30°C pour chacune des durées de conditionnement sont illustrées par les figures 3.21 et 3.22, respectivement. La Figure 3.21 contient aussi la courbe d'hystérésis des essais effectués à

20°C pour référence. L'examen des courbes d'hystérésis indique le même comportement que le composé B, mais avec une sensibilité plus importante aux basses températures du composé E par rapport au composé B. Pour les essais effectués à -8°C, les résultats montrent une augmentation de l'aire des boucles d'hystérésis et des niveaux de contrainte maximale atteints par rapport à ceux obtenus à 20°C. Par exemple, en se référant à 20°C la contrainte maximale augmente d'environ 40% après 24 h de conditionnement à -8°C pour une amplitude de déformation de 100%. Il est constaté aussi qu'il n'y a pas de différence entre les courbes d'hystérésis quand la durée de conditionnement augmente de 15 min à 14 j. Quant aux essais réalisés à -30°C, il est observé des augmentations plus importantes de l'aire des boucles d'hystérésis et des niveaux de contrainte maximale atteints par rapport à ceux obtenus à 20°C. Soit une augmentation de la contrainte maximale d'environ 148% après 24 h de conditionnement à -30°C pour une déformation de 100% comparativement à 20°C. Il est constaté aussi que les courbes d'hystérésis sont pratiquement similaires quand la durée de conditionnement augmente de 15 min à 24 h. Après 24 h de conditionnement, une légère augmentation de l'aire des boucles d'hystérésis et du niveau de contrainte maximale atteint est observée jusqu'à 14 j de conditionnement. Par exemple, le niveau de contrainte maximale augmente d'environ 7% quand la durée de conditionnement augmente de 24 h à 14 j pour une amplitude de déformation de 100%.

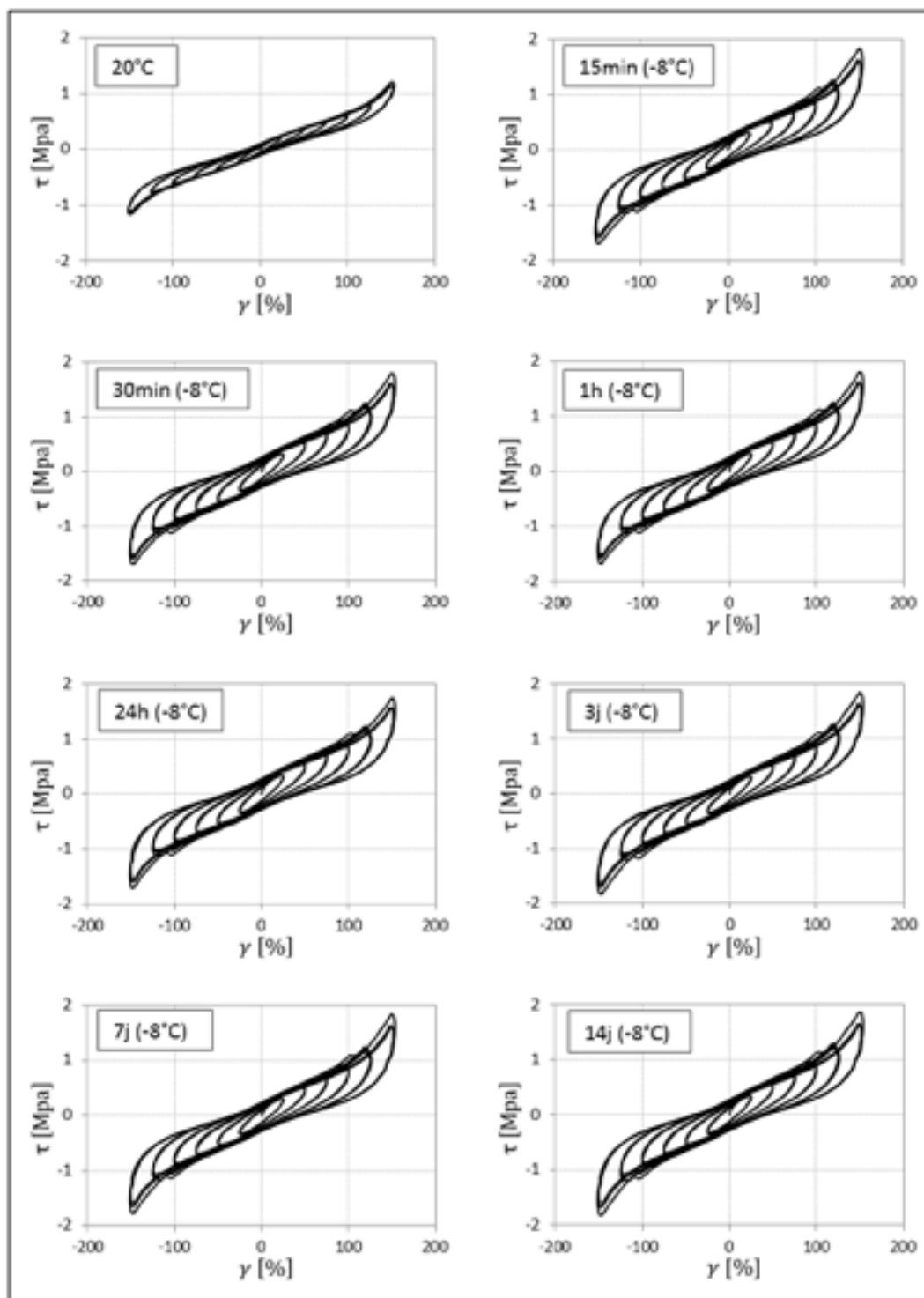


Figure 3.21 Courbes d'hystérésis du composé E à 20°C et à -8°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j

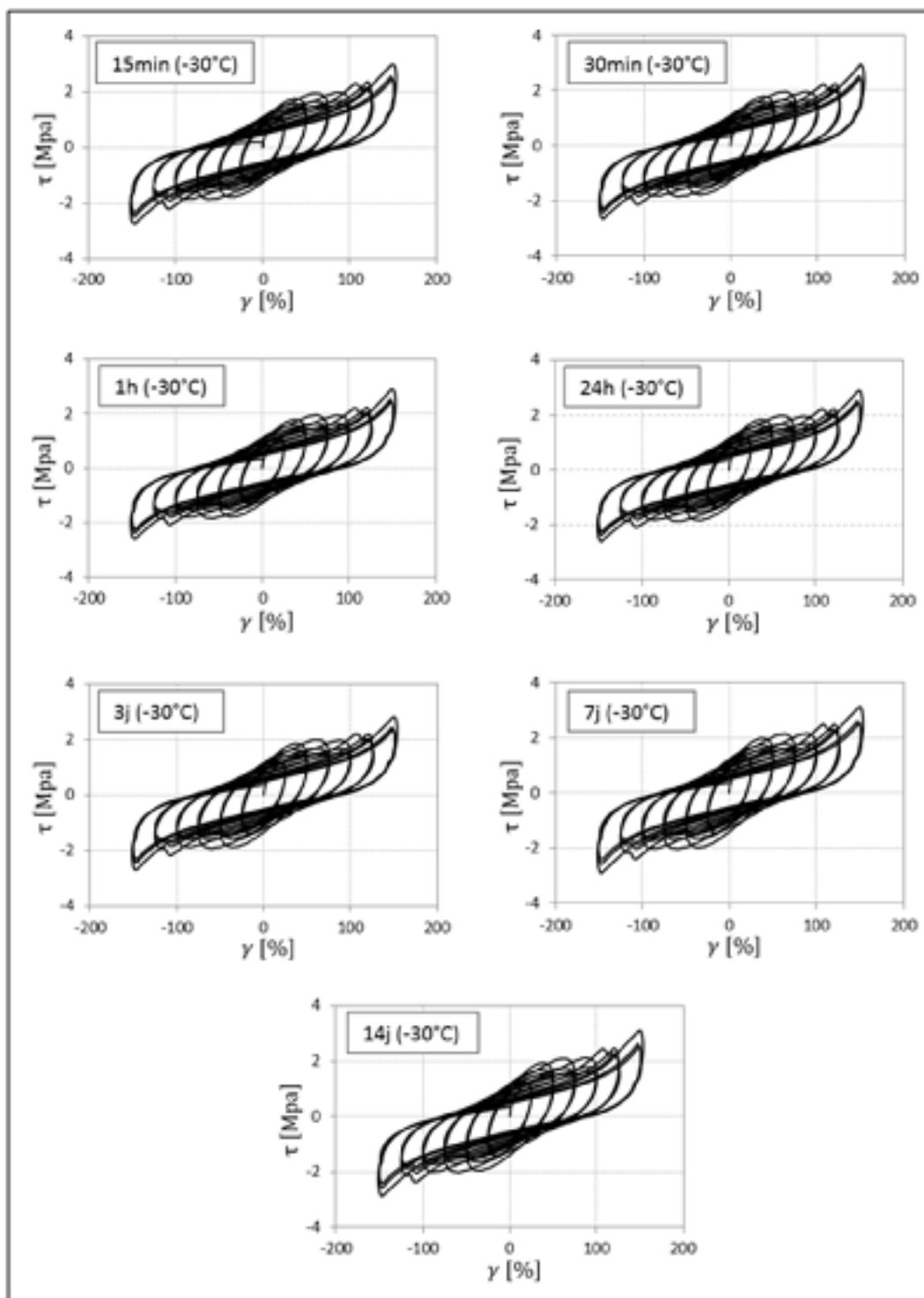


Figure 3.22 Courbes d'hystérésis du composé E à 20°C et à -8°C pour les différentes durées de conditionnement de 15 min à 14 j

3.4.3 Influence du nombre de cycles de chargement

Le Tableau 3.3 montre les rapports des modules de cisaillement effectif, du composé E, calculés au premier ($G_{\text{eff}}(1)$) et au troisième ($G_{\text{eff}}(3)$) cycle de charge à 20°C et à basses températures -8°C et -30°C après 14 j de conditionnement. Autant que pour les composés NAT55 et B, le rapport augmente avec la diminution de la température d'essai. Dépendamment du niveau de déformation, ce rapport est de l'ordre de 1,05 à 1,13 pour la température de -8°C et de l'ordre de 1,09 à 1,32 pour la température de -30°C.

Tableau 3.3 Effet du nombre de cycles de charge et la température sur le module de cisaillement effectif pour le composé E

Déformation (%)	Température (°C)	$G_{\text{eff}}(1)$ (MPa)	$G_{\text{eff}}(3)$ (MPa)	$\frac{G_{\text{eff}}(1)}{G_{\text{eff}}(3)}$
25	20	0.91	0.89	1.02
50		0.74	0.72	1.03
75		0.66	0.64	1.03
100		0.62	0.61	1.02
125		0.63	0.62	1.02
150		0.79	0.75	1.05
25	-8	1.38	1.32	1.05
50		1.12	1.05	1.07
75		1.01	0.93	1.09
100		0.95	0.87	1.10
125		0.95	0.93	1.02
150		1.21	1.07	1.13
25	-30	5.14	4.70	1.09
50		3.88	3.01	1.29
75		2.74	2.07	1.32
100		2.06	1.60	1.29
125		1.92	1.65	1.16
150		1.95	1.61	1.21

3.4.4 Effet de la durée de conditionnement et du niveau de déformation sur les caractéristiques mécaniques

Les variations du module de cisaillement effectif (G_{eff}) du composé E en fonction de l'amplitude de déformation pour les différentes durées de conditionnement à -8°C et -30°C

sont montrés par les figures 3.23(a) et 3.24(a), respectivement. Les résultats montrent des tendances similaires que le composé B, mais avec des proportions plus élevées notamment à -30°C . Pour la température de -8°C , il est observé que G_{eff} est pratiquement insensible à la durée de conditionnement. Il est noté aussi que, pour toutes les durées de conditionnement, l'élastomère montre une diminution de son module G_{eff} quand le niveau de déformation augmente de 25 à 100%, suivi d'une légère remontée aux niveaux de déformations de 125% et 150%. Cette remontée de G_{eff} est probablement due à la rigidification de l'élastomère à grande déformation. Quant aux spécimens testés à -30°C , G_{eff} montre une légère augmentation avec l'augmentation de la durée de conditionnement. Cette augmentation est, relativement, plus importante à des niveaux de déformations inférieures à 50% que pour les grands niveaux de déformations (100 à 150%). Par exemple, quand la durée de conditionnement augmente de 15 min à 14 j G_{eff} augmente d'environ 11% à amplitude de déformation de 25%, tandis qu'il augmente d'environ 6% à amplitude de déformation de 100%. Il est observé aussi que G_{eff} diminue quand le niveau de déformation augmente de 25 à 100% puis se stabilise entre les déformations de 100 et 150%.

Les variations de l'amortissement visqueux équivalent (ξ_{eq}) du composé E en fonction de la déformation pour les différentes durées de conditionnement à -8°C et -30°C sont montrés par les figures 3.23(b) et 3.24(b), respectivement. Autant que les composés NAT55 et B, la durée de conditionnement, semble ne pas avoir d'influence sur ξ_{eq} , et ce pour les deux températures d'expositions. Il est constaté également que ξ_{eq} diminue avec l'augmentation du niveau de déformation de 25 à 150%.

Les variations de la contrainte τ_0 du composé E en fonction du niveau de déformation pour les différentes durées de conditionnement de -8°C et de -30°C sont montrés par les figures 23(c) et 24(c), respectivement. Similairement au composé B, il est constaté que la contrainte τ_0 est pratiquement insensible à la durée de conditionnement pour les essais effectués à -8°C . Les résultats montrent aussi que τ_0 augmente quand le niveau de déformation augmente de 25 à 125%, suivi d'une diminution atypique entre les niveaux de déformation de 125% et 150%. Autant que les composés NAT55 et B, cette diminution peut être expliquée par le

retour à zéro imposé au dernier quart de cycle de charge d'amplitude 150% qui cause une diminution de la vitesse de déformation et, donc du niveau de contrainte τ_0 . Quant aux spécimens conditionnés à -30°C , il est constaté que τ_0 augmente légèrement avec la durée de conditionnement pour les niveaux de déformation inférieure à 50%, et qu'elle reste pratiquement inchangée entre les niveaux de déformation de 50% et de 150%. Il est observé également que τ_0 augmente quand la déformation augmente de 25 à 50%, puis diminue linéairement entre 50 et 150% de déformation. De même que le composé B, cela peut s'expliquer par le réchauffement interne du matériau durant le chargement cyclique incrémental, dues aux grandes quantités d'énergie dissipée par hystérésis.

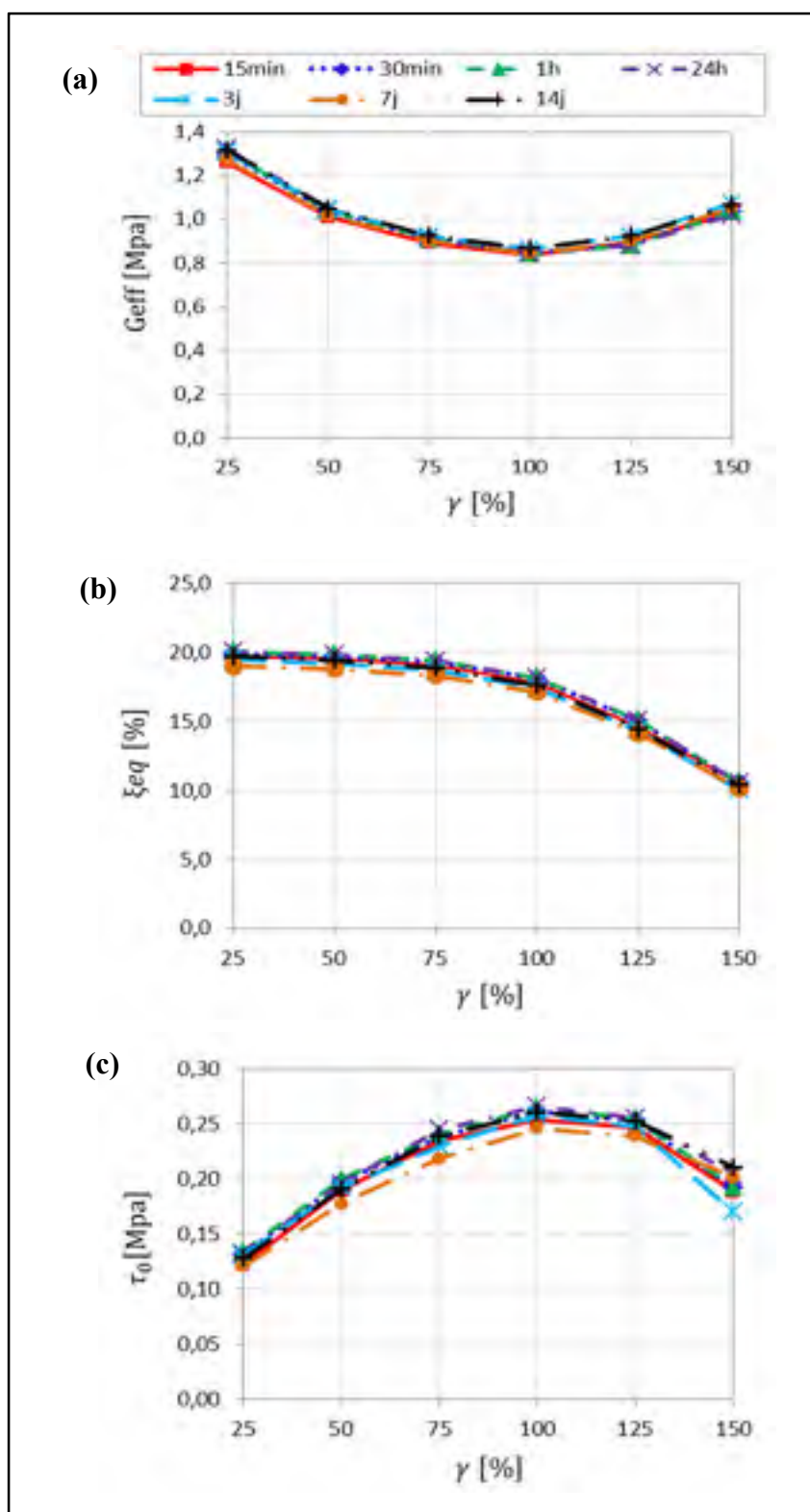


Figure 3.23 Effet de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé E testé à -8°C

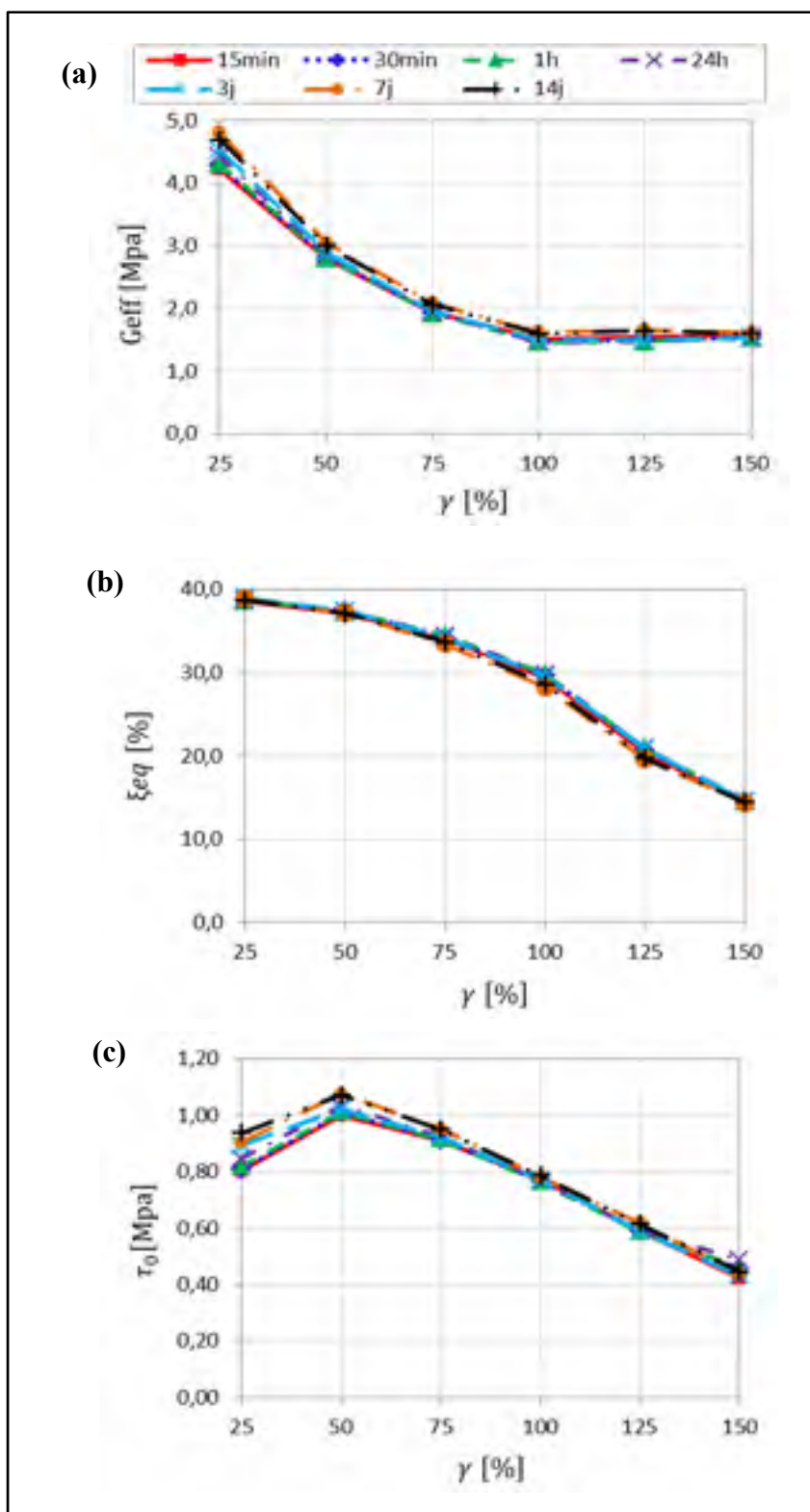


Figure 3.244 Effet de la durée de conditionnement et amplitude de déformation sur les caractéristiques mécaniques du composé E testé à -30°C

3.4.5 Cristallisation à basse température

Les courbes de cristallisation du composé E pour chacune des amplitudes de déformation appliquées aux températures de -8°C et de -30°C sont données par les figures 3.25(a) et 3.25(b), respectivement. Une tendance similaire que le composé B est observé autant que pour le raidissement thermique instantané que pour la cristallisation à basse température. À température de -8°C , un raidissement thermique instantané est constaté, atteint en moins d'une heure de conditionnement. Soit des valeurs du module de cisaillement effectif normalisé variant suivant le niveau de déformation entre 1,38 et 1,48. Entre 1 h et 14 j de conditionnement, le module de cisaillement normalisé reste pratiquement inchangé. Cela dénote que la cristallisation de l'élastomère ne s'est pas produite. Quant aux spécimens conditionnés à -30°C , un raidissement thermique instantané plus important est observé en moins d'une heure de conditionnement. Ce raidissement instantané est plus important pour les faibles niveaux de déformation (inférieure à 50%), que pour les grands niveaux de déformation (100% à 150%). Par exemple, à 25% de déformation le module de cisaillement normalisé atteint la valeur de 4,80, alors qu'il atteint la valeur de 2,42 à 100% de déformation. Le module de cisaillement effectif normalisé reste presque inchangé entre 1 h et 24 h de conditionnement. Avec l'augmentation de la durée de conditionnement de 24 h à 14 j, le module de cisaillement normalisé montre une légère augmentation, qui est de l'ordre de 5 à 11% dépendamment du niveau de déformation. Cela dénote un probable début de cristallisation de l'élastomère. Il est constaté aussi que, de même que le composé B, les basses températures ont plus d'influence à faible amplitude de déformation (25 à 50%) par rapport aux grandes amplitudes de déformation (100 à 150%).

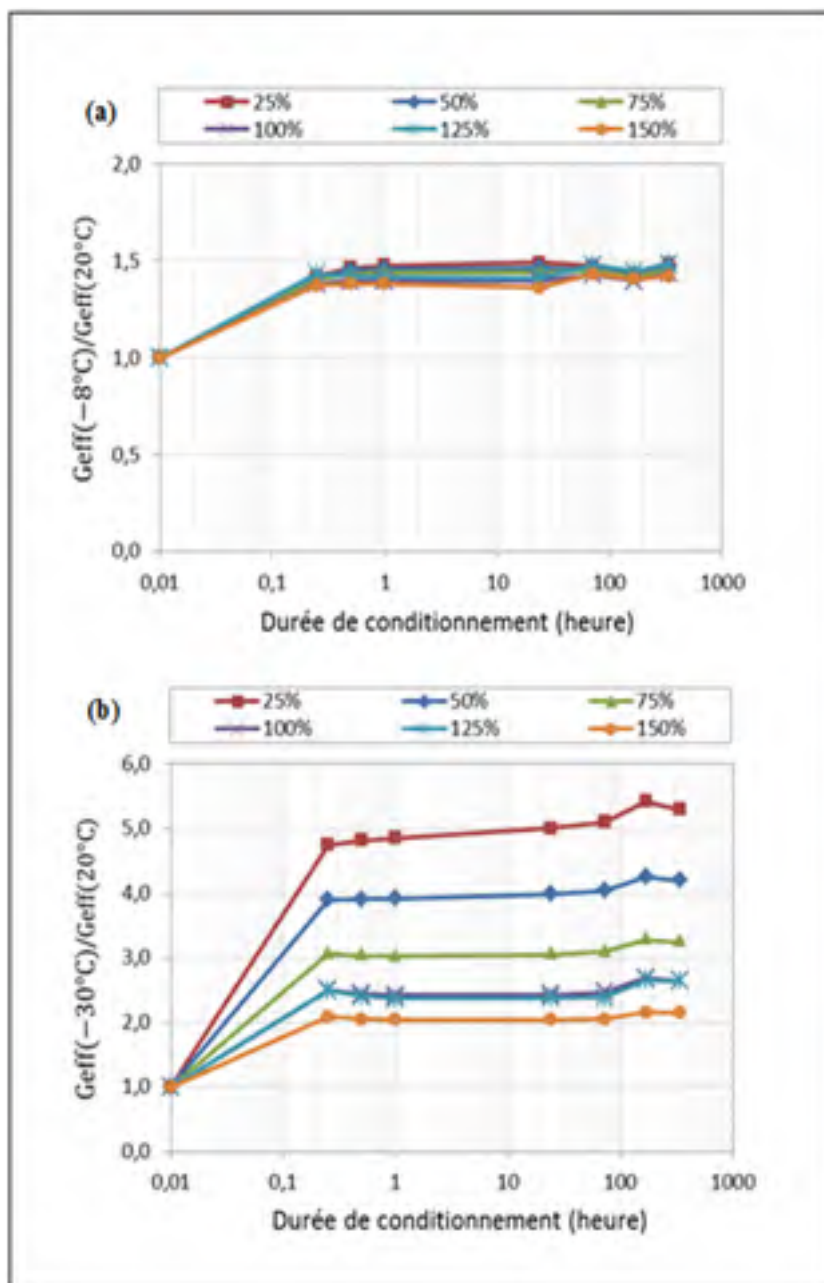


Figure 3.255 Courbes de cristallisation du composé E pour les différentes amplitudes de déformations appliquées (a) à $-8^{\circ}C$ et (b) à $-30^{\circ}C$

3.5 Discussion des résultats

Une campagne expérimentale a été menée afin d'étudier le comportement sous basses températures de trois composés élastomères soumis à des déformations cycliques en

cisaillement. En particulier, un composé en caoutchouc naturel à faible taux d'amortissement (composé NAT55) et deux autres à amortissement élevé (composé B et composé E) ont été mis à l'essai à différentes amplitudes de déformations (25 à 150%) et après des durées de conditionnements variables allant de 15 min à 14 j à des températures de -8°C et -30°C . L'analyse des résultats a montré que les durées de conditionnement de 1 h et 24 h donnent des valeurs presque similaires en termes de caractéristiques hystérétiques considérées (différence de 3% constatée pour les composés NAT55 et E aux essais à -30°C et 25% de déformation). Ainsi, l'interprétation des résultats est effectuée comme suit : les durées de conditionnements comprises entre 15 min et 24 h sont utilisées afin d'investiguer sur l'effet du raidissement thermique instantané, tandis que les durées d'essais comprises entre 24 h et 14 j sont considérées pour étudier l'effet de la cristallisation à basse température. Les résultats obtenus sont résumés dans ce qui suit.

3.5.1 Effet du raidissement thermique instantané

En général, il a été constaté que l'effet du raidissement thermique instantané est plus important à mesure que la température de l'essai est plus basse. Celui-ci cause une rigidification du matériau entraînant des augmentations du module de cisaillement effectif, ainsi qu'une augmentation de l'amortissement visqueux équivalent causé par de grandes quantités d'énergie dissipée. En outre, il a été observé que les composés à haut taux d'amortissement (composés B et E) sont plus sensibles au raidissement thermique instantané que le composé à faible taux amortissement (composé NAT55). Les Figures 3.26 et 3.27 comparent l'effet le raidissement thermique instantané sur les trois composés élastomères à températures de -8°C et de -30°C , respectivement. À température de -8°C les résultats montrent que le composé NAT55 présente une faible sensibilité au raidissement thermique instantané, soit une augmentation de la rigidité par rapport à celle mesurée à la température pièce d'environ 16% à une déformation de 25 % et de 8% à une déformation de 100%. Tandis qu'à -30°C , l'effet du raidissement thermique instantané du caoutchouc naturel est plus important atteignant une rigidification d'environ 50% à une déformation de 25% et d'environ 35 % à une déformation de 100%. Cependant, les composés B et E sont plus

influencés par le raidissement thermique instantané, avec un effet plus accentué pour le composé E notamment à température de -30°C . En effet, le composé B montre une augmentation de la rigidité, par rapport à celle mesurée à température pièce, d'environ 30% à -8°C et d'environ 130% à -30°C à amplitude de déformation de 100%. Tandis que pour le composé E, la rigidité augmente d'environ 40% à -8°C et d'environ 140% à -30°C à la même amplitude de déformation. Il est constaté, également, qu'à -30°C , la différence entre les composés B et E est plus importante à faible niveau de déformation, atteignant 66% à déformation de 25% et qui tend à se réduire pour les grandes déformations (6% à déformation de 100%).

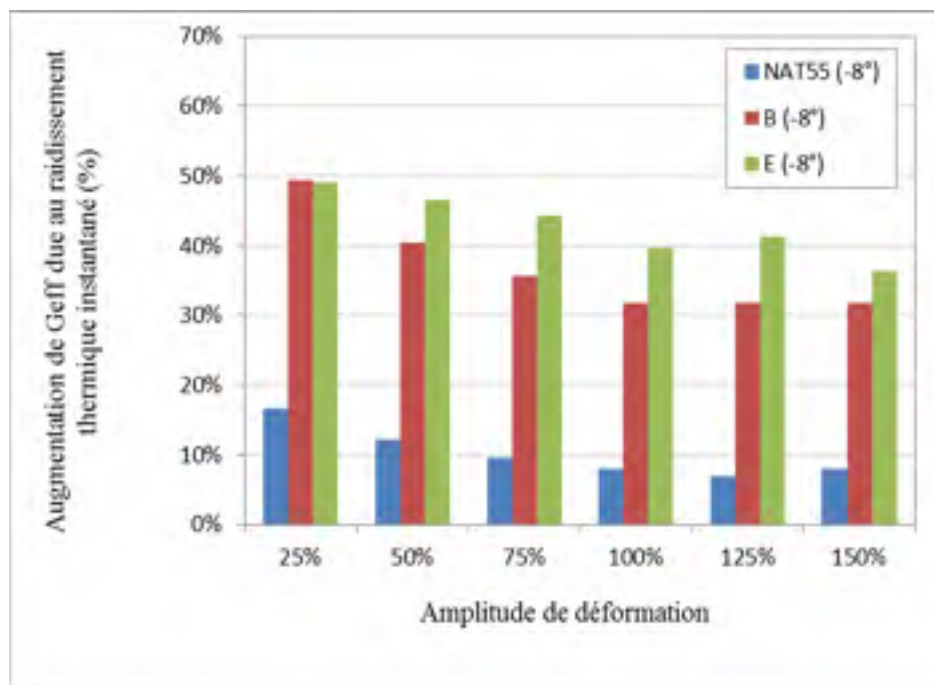


Figure 3.266 Augmentation de la rigidité due au raidissement thermique instantané pour les différentes amplitudes de déformation à -8°C

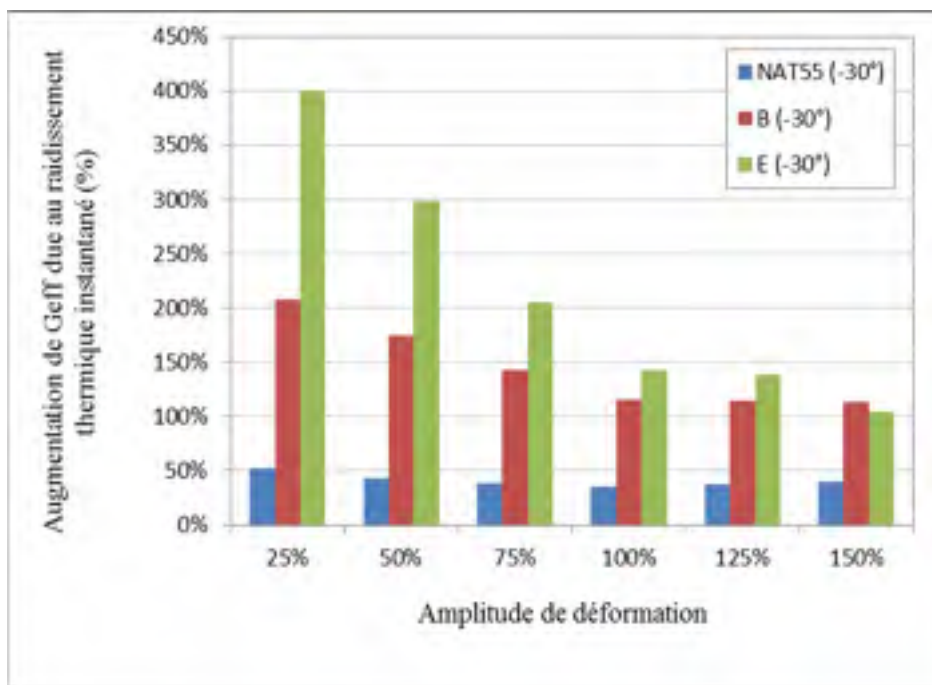


Figure 3.277 Augmentation de la rigidité due au raidissement thermique instantané pour les différentes amplitudes de déformation à -30°C

3.5.2 Effet de la cristallisation à basse température

Les essais effectués pour les longues durées de conditionnement montrent que la cristallisation n'a pas d'influence sur les trois composés d'élastomères étudiés à température de -8°C même après 14 j de conditionnement. En effet, les taux de rigidification mesurés après 24 h de conditionnement sont presque similaires à ceux calculés après 3, 7 et 14 j de conditionnement. Cependant, pour les essais effectués à -30°C, le raidissement par cristallisation diffère selon le composé élastomère. Le composé NAT55 montre une augmentation importante de la rigidité atteignant environ 52% quand la durée de conditionnement augmente de 24 h jusqu'à 14 j, à 100% de déformation. Par contre, les composés B et E montrent une faible sensibilité au raidissement par cristallisation comparativement au composé NAT55. En effet, l'augmentation de rigidité, comparativement à 24 h, s'établit approximativement à 6% pour le composé B et de 9% pour le composé E après 14 j de conditionnement à une déformation de 100%. Cette faible présence de cristallisation peut s'expliquer par le fait que ces composés possèdent de longues périodes

d'inductions (supérieure à 14 j), conduisant ainsi à réduire le taux de cristallisation. Ceci peut être le résultat d'additifs à base de Vinyle butadiène mis dans les composés B et E pour retarder la cristallisation. Ces résultats concordent avec ceux des études conduites par Fuller et al. (1997) et Fuller et al. (2004) indiquant un rallongement de la période d'induction pouvant aller à 20 j pour les élastomères durs et jusqu'à 30 j pour les élastomères mous. Aussi, cette hypothèse concorde et corroborée par le fait que le raidissement instantané observé est élevé (jusqu'à 140%), ce qui est cohérent avec les résultats rapportés par la littérature indiquant que les additifs permettant de retarder la cristallisation ont pour effet d'accroître le raidissement thermique instantané. Toutefois, seuls les essais pour de plus longues périodes de conditionnement (allant jusqu'à 30 jours au moins) peuvent le confirmer. Il est donc prudent de ne pas confirmer, pour le moment, que la cristallisation des composés B et E est non présente. Il est cependant rigoureusement constaté qu'elle ne se manifeste pas avant 14 jours.

3.5.3 Proposition de facteurs de modifications des propriétés

Des facteurs de modification permettant de tenir compte des changements dans les propriétés mécaniques des élastomères dues à l'effet des basses températures sont proposés. Ces facteurs nommés ($\lambda_{G_{eff}}$) et (λ_{τ_0}) ont été déterminés, respectivement, en normalisant le module de cisaillement effectif (G_{eff}) et la contrainte à déformation nulle (τ_0) calculés à basse température (-8°C et -30°C) avec leurs valeurs correspondantes obtenues à 20°C. Ils ont été calculés en considérant le troisième cycle de charge à amplitude de 100% de déformation pour les durées de conditionnement de 24 h et 14 j à température cible. Une comparaison avec les facteurs de modifications donnés par le code AASHTO (2010) a été, également, faite. On précise ici que les facteurs donnés par AASHTO (2010) sont pour les deux températures d'exposition de -10°C et -30°C. Les équations de normalisation pour chacune des propriétés sont indiquées par les relations suivantes :

$$\lambda_{G_{eff}} = \frac{G_{eff}(T^{\circ})}{G_{eff}(20C^{\circ})} \quad (3.5)$$

$$\lambda_{\tau_0} = \frac{\lambda_{\tau_0}(T^{\circ})}{\lambda_{\tau_0}(20C^{\circ})} \quad (3.6)$$

La Figure 3.28 compare les facteurs de modification du composé NAT55 obtenus dans cette étude expérimentale avec ceux donnés par le code AASHTO (2010) relatif aux isolateurs en élastomères à faible taux d'amortissement. Il est constaté qu'à température de -8°C , les résultats trouvés ici sont proches des facteurs de modifications donnés par le code AASHTO (2010), et cela pour les deux durées de conditionnement considérées (24 h et 14 j). Tandis qu'à température de -30°C , il est observé que les valeurs obtenues dans cette étude sont élevées par rapport à ceux donnés dans AASHTO (2010), notamment pour la durée de 14 j de conditionnement (2,05 contre 1,30 pour λ_{Geff} et 3,55 contre 1,50 pour λ_{τ_0}).

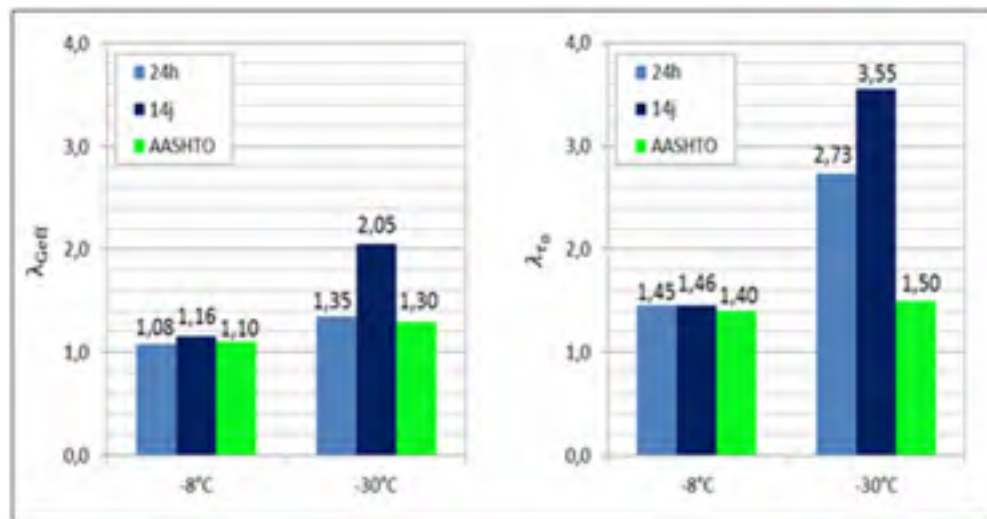


Figure 3.28 Comparaison des facteurs de modification du composé NAT55 obtenus dans cette étude avec ceux donnés par le code AASHTO 2010

La Figure 3.29 compare les facteurs de modification obtenus dans cette étude expérimentale pour (a) le composé B et (b) le composé E avec ceux donnés par le code AASHTO (2010) relatif aux isolateurs élastomères à haut taux d'amortissement. Il est constaté que les facteurs de modification calculés à température de -8°C pour le composé B sont comparables à ceux fournis par le code AASHTO 2010, et cela indépendamment de la durée de conditionnement (1,33 contre 1,20 pour λ_{Geff} et 1,84 contre 1,40 pour λ_{τ_0}). Tandis qu'à -30°C , il est constaté des différences notables pour les deux propriétés. Cette différence est plus accentuée pour le

facteur λ_{τ_0} que pour le facteur λ_{Geff} (2,50 contre 1,40 pour λ_{Geff} et 5,10 contre 2,0 pour λ_{τ_0}). Cependant, le composé E présente des écarts, par rapport au code AASHTO (2010), légèrement plus élevés au composé B en termes de λ_{Geff} et cela pour les deux températures d'expositions considérées. Par contre, en termes de λ_{τ_0} des écarts très importants sont observés particulièrement à -30°C (2,80 contre 1,40 à -8°C et 8,20 contre 2,0 à -30°C).

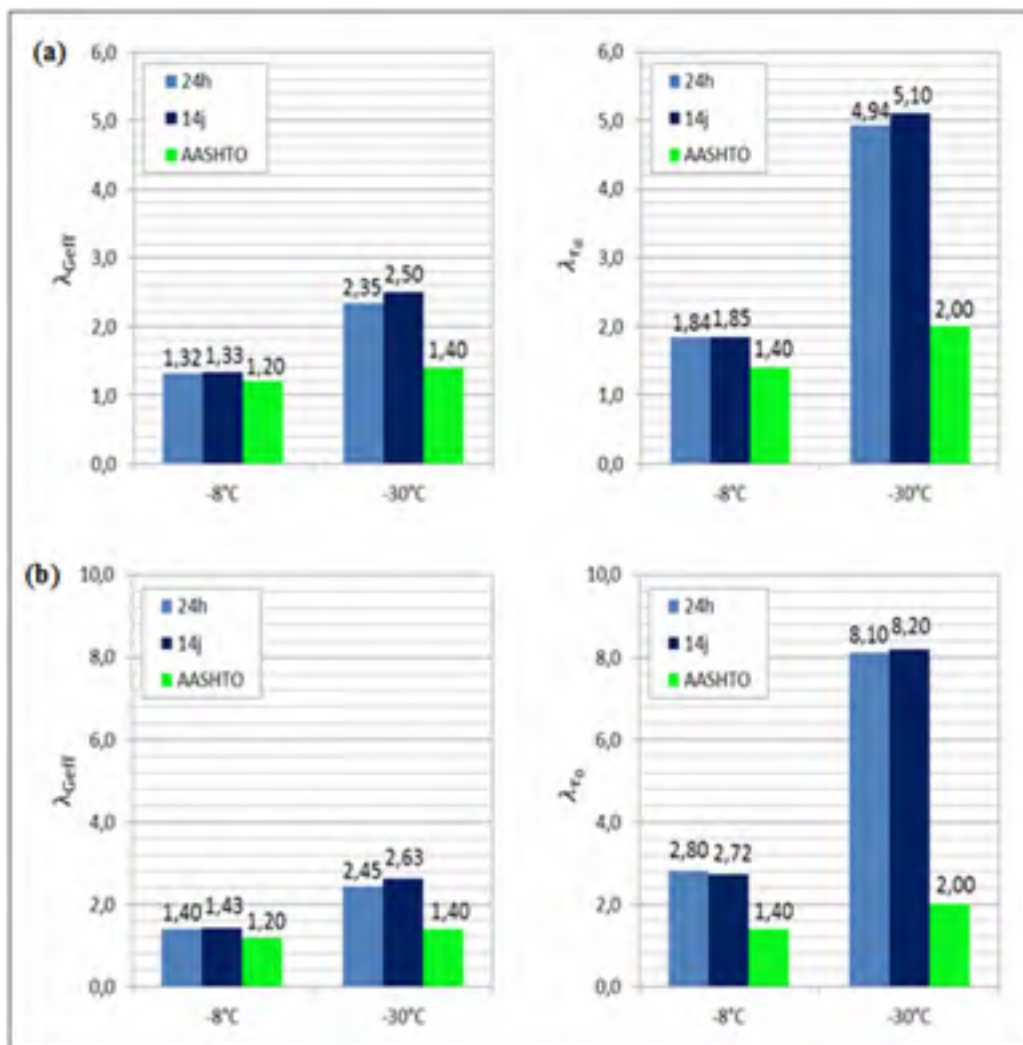


Figure 3.29 Comparaison des facteurs de modification obtenus dans cette étude avec ceux donnés par le code AASHTO 2010 (a) composé B (b) composé E

Les facteurs de modification calculés dans cette étude sont plus conservateurs que les facteurs proposés par le code AASHTO (2010), notamment à très basse température de

-30°C. Cela peut s'expliquer par le fait que le code AASHTO (2010) ne prend pas en compte la durée de conditionnement à basses températures et aussi des différences qui peuvent exister dans les types des composés, étant donné que le comportement des élastomères à basse température dépend fortement de leur formulation chimique et du système de cure. Toutefois, ces résultats contribuent d'une manière générale à la compréhension du comportement des élastomères et isolateurs en élastomères face aux expositions prolongées aux basses températures, particulièrement pour les isolateurs où l'élastomère est le principal matériau qui détermine leur comportement.

À la lumière des résultats obtenus, il est de notre avis que les exigences actuelles du code CSA (2014a) sont trop sévères puisqu'elles s'appliquent de manière systématique pour chaque projet sans pour autant permettre de détecter une cristallisation des élastomères à haut taux d'amortissement.

Il ressort qu'il vaut mieux que le code CSA (2014a) exige des essais de qualification plus poussés sur des spécimens de petite taille, comme ceux utilisés dans notre étude, mais pour des durées d'exposition plus longues. Ces essais permettent de caractériser chaque élastomère utilisé et valider les facteurs de modification adoptés lors de la conception. Ces essais doivent être complétés par des essais sur des unités d'isolation sismique à échelle réelle représentatives de celles utilisés sur les projets. Toutefois, une fois le comportement de l'élastomère à basse température est caractérisé et que ceci est validé sur des unités pleine grandeur, il est de notre avis qu'il n'est pas nécessaire de refaire les essais pleine grandeur de manière systématique pour chaque projet.

CHAPITRE 4

EFFET DES BASSES TEMPÉRATURES SUR LA RÉPONSE SISMIQUE DES PONTS ISOLÉS AVEC ISOLATEURS EN ÉLASTOMÈRES

4.1 Introduction

Il a été démontré au chapitre précédent que les basses températures causent des augmentations significatives de la rigidité des élastomères. Cette rigidification dépend de plusieurs facteurs, notamment du type d'élastomères, de la température et de la durée de conditionnement. Dans le cas des structures de ponts construits avec des isolateurs à base élastomère, le principal effet de cette rigidification est l'augmentation des forces transmises par le système d'isolation à la structure de pont lors des épisodes de séismes (D. Cardone & Gesualdi, 2012). L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les effets des basses températures sur la réponse sismique des ponts isolés avec isolateurs en élastomères. Les résultats des essais présentés au chapitre 3 sont utilisés dans ce but.

Dans un premier temps, ce chapitre se concentre à exprimer les résultats des essais sous forme d'expressions numériques. Ces expressions permettent de prédire l'effet des basses températures et de la durée de conditionnement sur les propriétés mécaniques des élastomères étudiés. En second lieu, un pont régulier de deux travées situé à la ville de Montréal est considéré pour des fins d'exploration numérique. Deux systèmes d'isolations de la base du pont modélisé par un système à un degré de liberté (1DDL) sont conçus séparément : le premier est constitué d'isolateurs en LRB et le deuxième est constitué d'isolateurs en HDRB. Ensuite, les propriétés mécaniques de chacun des systèmes d'isolations sont modifiées en tenant compte des effets des basses températures et de la durée de conditionnement, dérivées des expressions numériques d'essais. Finalement, les modèles de ponts isolés sont soumis à des analyses temporelles non linéaires en considérant les propriétés avec et sans effet de la température. Plusieurs séismes historiques et artificiels calibrés sur le spectre du site sont utilisés dans ces analyses.

4.2 Expression numérique des résultats expérimentaux

Les résultats des essais effectués au chapitre trois montrent que les basses températures et la durée de conditionnement, ainsi que d'autres paramètres comme le niveau de déformation et la formulation du caoutchouc, ont un impact significatif sur les propriétés mécaniques des élastomères. En outre, les résultats indiquent que le raidissement thermique instantané dépend fortement de la composition de l'élastomère et du niveau d'exposition aux basses températures, tandis que la cristallisation dépend, entre autres, de la composition de l'élastomère, de la basse température et de la durée de conditionnement aux basses températures. Dans le but d'utiliser les résultats expérimentaux comme outils de prédiction des propriétés mécaniques des élastomères due aux effets des basses températures, ces résultats sont exprimés sous forme numérique pour chacun des élastomères testés. Ainsi, le raidissement thermique instantané est exprimé en fonction de la température en effectuant une interpolation linéaire des propriétés mécaniques obtenues entre les deux températures d'essais de -8°C et de -30°C après 24 heures de conditionnement. L'effet de la cristallisation, quant à lui, est exprimé en fonction de la durée de conditionnement comprise entre 1 et 14 jours pour la température d'exposition de -30°C en effectuant une régression linéaire des résultats obtenus. Le niveau de déformation de 100% est considéré dans la formulation analytique des résultats, car celui-ci représente, généralement, le niveau de déformation atteint par les isolateurs sous séismes.

L'équation 4.1 exprime l'effet du raidissement thermique instantané sur les propriétés mécaniques normalisées à température de 20°C pour chaque matériau.

$$P_T = a_T T^{\circ} + b_T \quad -8^{\circ}\text{C} \geq T^{\circ} \geq -30^{\circ}\text{C} \quad (4.1)$$

Où P_T représente soit le module de cisaillement effectif normalisé ou l'amortissement visqueux équivalent normalisé ou la contrainte à déformation cyclique nulle normalisée, T° est la température et a_T et b_T sont des constantes données au tableau 4.1 pour chaque propriété et matériau.

Tableau 4.1 Valeurs des constantes des équations caractérisant l'effet du raidissement thermique instantané

Propriétés	Matériau	a_T	b_T
$G_{\text{eff}}(T^\circ)/G_{\text{eff}}(20^\circ\text{C})$	NAT55	-0,012	0,982
	B	-0,047	0,942
	E	-0,047	0,980
$\xi_{\text{eq}}(T^\circ)/\xi_{\text{eq}}(20^\circ\text{C})$	NAT55	-0,041	1,030
	B	-0,037	1,131
	E	-0,017	1,936
$\tau_0(T^\circ)/\tau_0(20^\circ\text{C})$	NAT55	-0,057	0,950
	B	-0,141	0,719
	E	-0,240	0,875

En effectuant une régression linéaire aux résultats d'essais, des droites empiriques caractérisant l'effet de la cristallisation à basse température sur les propriétés mécaniques des élastomères sont obtenues. Ces droites présentent les variations de G_{eff} et τ_0 tous deux normalisés à température de 20°C en fonction de la durée de conditionnement à -30°C correspondant à une amplitude de déformation de 100%. Les Figures 4.1 et 4.2 illustrent ces droites pour les trois élastomères. Tel qu'indiqué au chapitre 3, l'amortissement visqueux équivalent (ξ_{eq}) ne présente pas de changement avec la durée de conditionnement aux basses températures, donc celui-ci n'a pas été considéré dans cette section.

L'équation 4.2 est utilisée pour représenter ces droites, où $P_{D_{100}}^{-30}$ représente soit le module de cisaillement effectif normalisé ou la contrainte à la déformation cyclique nulle normalisée correspondant à une température de -30°C et un niveau de déformation de 100%, D est la durée de conditionnement en jours, a_D et b_D sont des constantes des droites de régression et R^2 est le coefficient de détermination. Le Tableau 4.2 donne les valeurs des constantes a_D et b_D et du coefficient R^2 pour chaque propriété et matériau.

$$P_{D_{100}}^{-30} = a_D D + b_D \quad 1j \leq D \leq 14j \quad (4.2)$$

Tableau 4.2 Valeurs des constantes des équations caractérisant l'effet de la cristallisation à basse température

Propriétés	Matériau	a_D	b_D	R^2
$G_{\text{eff}}(-30^\circ\text{C})/G_{\text{eff}}(20^\circ\text{C})$	NAT55	0,053	1,289	0,988
	B	0,012	2,352	0,800
	E	0,018	2,445	0,630
$\tau_0(-30^\circ\text{C})/\tau_0(20^\circ\text{C})$	NAT55	0,061	2,697	0,991
	B	0,014	4,912	0,985
	E	0,015	8,072	0,968

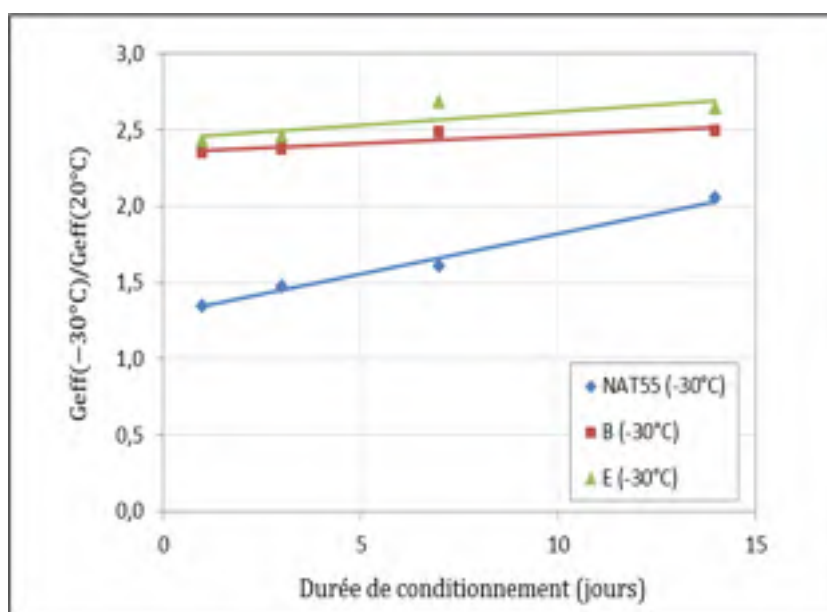


Figure 4.1 Tendance du module de cisaillement effectif normalisé caractérisant l'effet de la cristallisation à -30°C et 100% de déformation

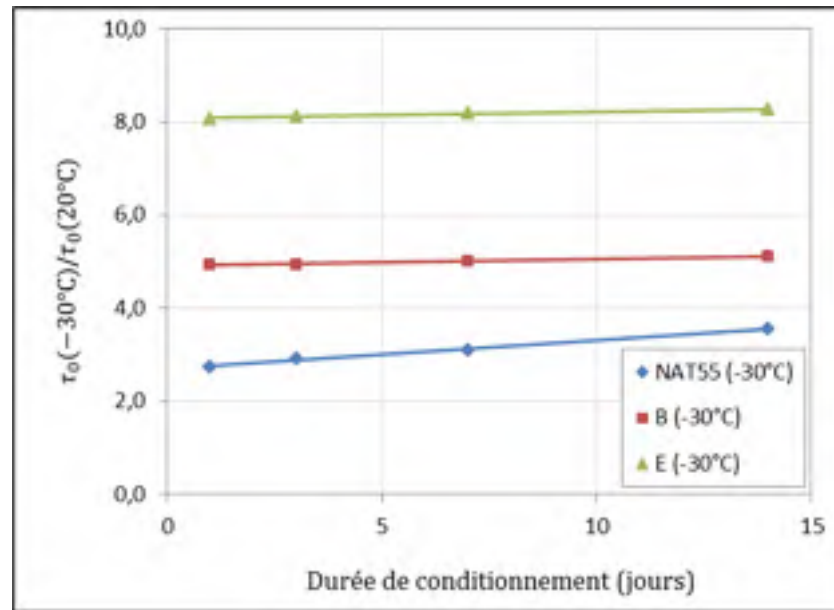


Figure 4.2 Tendence de la contrainte à déformation cyclique nulle normalisée caractérisant l'effet de la cristallisation à -30°C et 100% de déformation

4.3 Conception des systèmes d'isolations : méthode simplifiée du code CSA, (2014a)

L'analyse spectrale uni modale et sous charge uniforme donnée par le code (CSA, 2014a) est utilisée pour la conception des systèmes d'isolations de la structure de pont, tout en respectant les exigences de son application. Le pont est modélisé par un système à un degré de liberté (1DDL) de masse concentrée au sommet et encastré à sa base. Le poids sismique total de la superstructure du pont est $W = 16\,000$ kN. La sous-structure du pont est considérée comme infiniment rigide, cette hypothèse est raisonnable vu que l'étude s'intéresse au comportement du système d'isolation. Le spectre des accélérations considéré est celui donné par le code canadien des ponts routiers (CSA, 2014a), pour la ville de Montréal sur un sol de classe C, correspondant à une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans.

Deux systèmes d'isolations sont considérés. Le premier est constitué d'isolateurs en élastomère à noyau de plomb (LRB), et le deuxième est constitué d'isolateurs en élastomère à amortissement élevé (HDRB). Pour le système d'isolation en LRB, les propriétés

nominales (à température ambiante, soit 20°C) des isolateurs ont été sélectionnées de manière à avoir une période d'isolation de 2,0 s et un amortissement visqueux équivalent de 20%. Quant au système d'isolation en HDRB, ces propriétés nominales ont été choisies pour avoir une période d'isolation de 2,0 s et un amortissement visqueux équivalent de 15%. Pour les deux systèmes d'isolations conçus, la valeur de K_d est prise supérieure ou égale à $0,025W/\Delta_{max}$, où Δ_{max} est le déplacement sismique maximal du système d'isolation (CSA, 2014a). Le Tableau 4.3 présente les propriétés nominales de chacun des deux systèmes d'isolations considérés.

Tableau 4.3 Propriétés hystérétiques des systèmes d'isolations

	Q_d (kN)	K_d (kN/m)	K_u (kN/m)	K_{eff} (kN/m)	Δ_{max} (mm)
LRB	290	11 000	110 000	15 800	50
HDRB	240	12 000	90 000	15 500	52

Une conception préliminaire des isolateurs en élastomère à noyau de plomb pour le pont est effectuée. Les propriétés d'un isolateur au niveau des culées sont : $Q_d = 458,34$ kN et $K_d = 12,10$ kN/m. Tandis que pour la pile, les propriétés d'un isolateur sont : $Q_d = 916,70$ kN et $K_d = 24,20$ kN/m. Le module de cisaillement de l'élastomère, G_r , et la contrainte élastique limite du plomb, σ_{yL} , des isolateurs sont supposés être de 0,77 MPa et de 10 MPa, respectivement. Les dimensions préliminaires des isolateurs obtenues, à titre indicatif, sont :

Aux culées

Dimensions en plan : 450 x 450 mm x mm

Hauteur totale (hors tout, sans les plaques extérieures): 350 mm

Diamètre du noyau de plomb : 39 mm

À la pile

Dimensions en plan : 610 x 610 mm x mm

Hauteur totale (hors tout, sans les plaques extérieures) : 350 mm

Diamètre du noyau de plomb : 55 mm

4.4 Effet des basses températures sur les propriétés des isolateurs sismiques

Afin de tenir compte des effets des basses températures correspondant au raidissement thermique instantané et à la cristallisation, les propriétés nominales des systèmes d'isolations, en termes de résistance caractéristique (Q_d) et de rigidité post-élastique (K_d), ont été modifiées pour chaque système d'isolation. Le système d'isolation en HDRB est considéré fabriqué avec le composé B, tandis que le système d'isolation en LRB est considéré construit avec le composé NAT55. Ainsi, pour le système d'isolation en HDRB, Q_d et K_d sont liées directement aux propriétés de l'élastomère, donc ont été modifiées simultanément pour tenir compte de l'effet de la température. Pour ce faire, K_d est multipliée par la valeur du module de cisaillement effectif normalisé, tandis que Q_d est multipliée par la valeur de la contrainte à déformation cyclique nulle normalisée. Pour ce qui est du système d'isolation en LRB, la rigidité post-élastique (K_d) est liée directement à la rigidité de l'élastomère, donc celle-ci a été modifiée en la multipliant par la valeur du module de cisaillement effectif normalisé. Quant à la résistance caractéristique (Q_d), sa valeur est gouvernée par les propriétés du noyau de plomb notamment sa résistance élastique limite (σ_{yL}), laquelle est influencée par température initiale interne de l'isolateur, comme indiqué à la section 1.3 du chapitre 1. La valeur de σ_{yL} est par la suite fortement influencée par le chargement cyclique latéral qui cause des augmentations considérables de la température du noyau de plomb entraînant, de ce fait, des variations dans la valeur de Q_d . Cet effet n'a pas été pris en compte dans cette étude, et que nous avons considéré des changements non significatifs de la limite élastique du noyau de plomb (σ_{yL}), laquelle affecte Q_d . Donc la valeur de la résistance caractéristique (Q_d) est gardée constante pour le système d'isolation en LRB.

Le composé E présente des facteurs de variation des propriétés mécaniques dû à l'effet des basses températures très élevés, donnant ainsi un déplacement élastique limite (Δ_y), du système d'isolation, supérieur au déplacement latéral maximal (Δ_{max}). De ce fait, le comportement du système d'isolation devient élastique linéaire et ne peut être représenté par un modèle bilinéaire. Ceci dénote que l'usage du composé E n'est pas recommandé à très basses températures, puisque celles-ci causent de grandes rigidifications de l'élastomère. Par conséquent, le composé E n'est pas considéré dans ce chapitre.

4.5 Analyses dynamiques temporelles non linéaires

Après la conception des systèmes d'isolations, les modèles de ponts ont été soumis à des analyses temporelles non linéaires effectuées avec le logiciel de calcul SAP2000 (CSI, 2019). Le modèle bilinéaire a été adopté pour représenter le comportement hystérétique des systèmes d'isolations lors des analyses sismiques. Ces dernières ont été réalisées en considérant les propriétés mécaniques nominales et modifiées des systèmes d'isolations dues aux basses températures. L'effet du raidissement thermique instantané est exprimé en fonction de la température d'exposition pour une durée de conditionnement de 24 h. L'effet de la cristallisation, quant à lui, est exprimée en fonction de la durée de conditionnement à température d'exposition de -30°C . Deux ensembles d'accélérogrammes historiques (réels) et artificiels ont été considérés séparément pour les analyses sismiques. Les résultats calculés et analysés sont la force sismique maximale à la base transmise par les isolateurs à la sous-structure du pont et le déplacement horizontal maximal des isolateurs. Les quantités déterminées sous les propriétés modifiées sont, ensuite, normalisées par leurs valeurs nominales correspondantes pour chaque accélérogrammes. Finalement, les réponses moyennes des quantités normalisées sont calculées pour chacun des deux ensembles d'accélérogrammes historiques et artificiels considérés.

4.5.1 Accélérogrammes

Les accélérogrammes choisis sont composés des enregistrements sismiques historiques et des séismes artificiels représentatifs des régions de l'Est du Canada (Montréal). Les

enregistrements historiques proviennent des séismes qui se sont produits dans les localités de Nahanni, Saguenay et Val-des-Bois. Les séismes artificiels, quant à eux, ont été sélectionnés dans la banque des séismes simulés numériquement par Atkinson (2009) pour l'Est du Canada. Afin de correspondre aux conditions locales de site, tous les séismes ont été calibrés sur le spectre de réponse cible $S_T(T)$ donné par code CSA (2014a) pour la ville de Montréal correspondant à un sol de type C et une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans.

4.5.1.1 Calibration des séismes historiques

Le Tableau 4.4 donne les composantes de chacun des séismes historiques ainsi que leurs caractéristiques utilisées dans les analyses. Ces séismes ont été calibrés individuellement en utilisant le logiciel SeismoMatch (Seismosoft, 2018) pour correspondre au spectre cible $S_T(T)$. Un intervalle de périodes comprises entre 0,2 s et 4,0 s a été considéré dans la calibration. Cet intervalle est choisi, vu qu'il couvre toutes les périodes d'isolations des cas de modèles de ponts étudiées avec les propriétés nominales et modifiées des systèmes d'isolations. La Figure 4.3 montre le spectre cible superposé aux spectres des séismes historiques et leur spectre moyen après calibration.

Tableau 4.4 Séismes historiques choisis pour les analyses ainsi que leurs caractéristiques

Évènement	Composantes	Année	Mw	R (km)	PGA (g)
Nahanni	Bettlement Creek N 270°	1985	6,5	24,0	0,186
	Bettlement Creek N 360°	1985	6,5	24,0	0,194
Val-des Bois	Ottawa N-S 0°	2010	5,0	58,7	0,033
	Ottawa E-O 270°	2010	5,0	58,7	0,034
Saguenay	Chicoutimi Nord N 124	1988	5,9	43,0	0,131
	Chicoutimi Nord N 214	1988	5,9	43,0	0,106
Saguenay	Les Éboulements N-S 0°	1988	5,9	90,0	0,125
	Les Éboulements E-O 270°	1988	5,9	90,0	0,102
Saguenay	Saint-André N-S 0°	1988	5,9	64,0	0,156
	Saint-André E-O 270°	1988	5,9	64,0	0,091

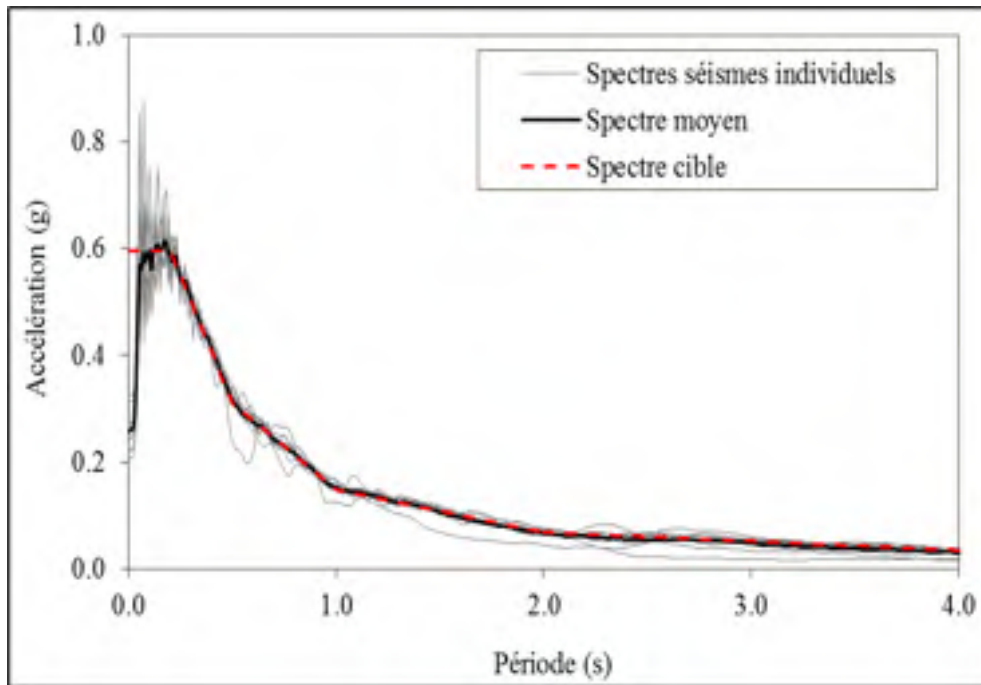


Figure 4.3 Spectres cible et des séismes historiques choisis après calibration

4.5.1.2 Sélection et calibration des séismes artificiels

Les séismes artificiels utilisés dans cette étude sont pris de la série des accélérogrammes simulés par Atkinson (2009) pour la région de l'Est du Canada pour un sol de classe C. Cette série contient deux scénarios de séismes définis par leur magnitude et distance par rapport à la source du séisme (M-R). Le premier est le scénario M6,0 ayant des distances plus proche de la source, et le deuxième est le scénario M7,0 ayant des distances plus loin de la source. Dans chacun des scénarios, huit (8) accélérogrammes sont sélectionnés et calibrés sur le spectre cible $S_T(T)$ selon la méthode proposée par Tremblay et al. (2015). Les étapes du processus de sélection et calibration des accélérogrammes sont définis ci-dessous :

Définition de l'intervalle des périodes

Cette étape consiste à définir un intervalle des périodes maximales et minimales pour chaque scénario sur lesquelles les accélérogrammes artificiels sont calibrés. Cet intervalle est fonction de la période fondamentale de la structure isolée (T_{1isol}), et est donnée comme suit :

$$T_{min} = \min [0,2 T_{isol} ; T_{90\%}] \quad (4.3)$$

$$T_{max} = \max [2,0 T_{isol} ; 1,5 s] \quad (4.4)$$

Où, $T_{90\%}$ représente la période du mode qui engendre 90% de participation de la masse totale de la structure. Pour notre cas, le système étudié est à 1DDL, toute la masse est incluse dans l'unique mode de vibration de la structure avec une période d'isolation de 2,0 s. L'intervalle des périodes est donc de 0,4 s à 4,0 s. Selon Tremblay et al. (2015), pour les structures isolées à la base, la définition de la période minimale (T_{min}) doit être établie selon un jugement d'ingénieur où des périodes plus petites sont nécessaires afin de s'assurer que la réponse des modes supérieures associés aux séismes de hautes fréquences est prédite. Ainsi, l'intervalle des périodes considéré est de 0,1 s à 4,0 s. Pour le scénario M6,0 ayant une distance de la faille comprise entre 10 km et 30 km, les accélérogrammes sont calibrés sur un intervalle de périodes comprises entre 0,1 s et 1,5 s, et le scénario M7,0 ayant une distance de la faille comprise entre 20 km et 98,6 km, les accélérogrammes sont calibrés sur un intervalle de périodes comprises entre 1,0 s et 4,0 s.

Définition du spectre de réponse cible

Le spectre de réponse cible $S_T(T)$ est celui défini par code (CSA, 2014a) pour la ville de Montréal correspondant à un sol de type C et une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans tel qu'indiqué à la section 4.5.4 de ce chapitre.

Sélection des accélérogrammes

Huit (8) accélérogrammes sont sélectionnés pour chacun des deux scénarios M6,0 et M7,0. Pour ce faire, les spectres de chacun des accélérogrammes $S_g(T)$ à 5% d'amortissement des deux scénarios sont déterminés, et le rapport spectral $S_T(T)/S_g(T)$ est calculé pour chaque période. Ensuite, la moyenne et l'écart-type des rapports $S_T(T)/S_g(T)$ sont calculés dans l'intervalle des périodes choisies pour chaque scénario, et les accélérogrammes ayant l'écart-type les plus petits avec une moyenne comprise entre 0,5 et 2,0 sont sélectionnés.

Calibration des accélérogrammes

Les accélérogrammes sélectionnés, pour chacun des deux scénarios, sont multipliés par les facteurs de calibration afin d'obtenir les accélérogrammes calibrés. Les facteurs de calibration sont les moyennes des rapports $S_T(T)/S_g(T)$ calculées avant. Ensuite, le spectre moyen des accélérogrammes calibrés pour chaque scénario est comparé au spectre cible $S_T(T)$. Vérifier si le spectre moyen des accélérogrammes calibrés n'est pas inférieur de plus de 10% du spectre cible $S_T(T)$, sinon un deuxième facteur de calibration est appliqué aux accélérogrammes calibrés de sorte que le spectre moyen des accélérogrammes soit supérieur ou égale à 90% du spectre cible.

Le Tableau 4.5 montre les caractéristiques des accélérogrammes artificiels sélectionnés, et la figure 4.4 illustre le spectre cible ainsi que les spectres individuels et moyens pour chacun des scénarios après calibration.

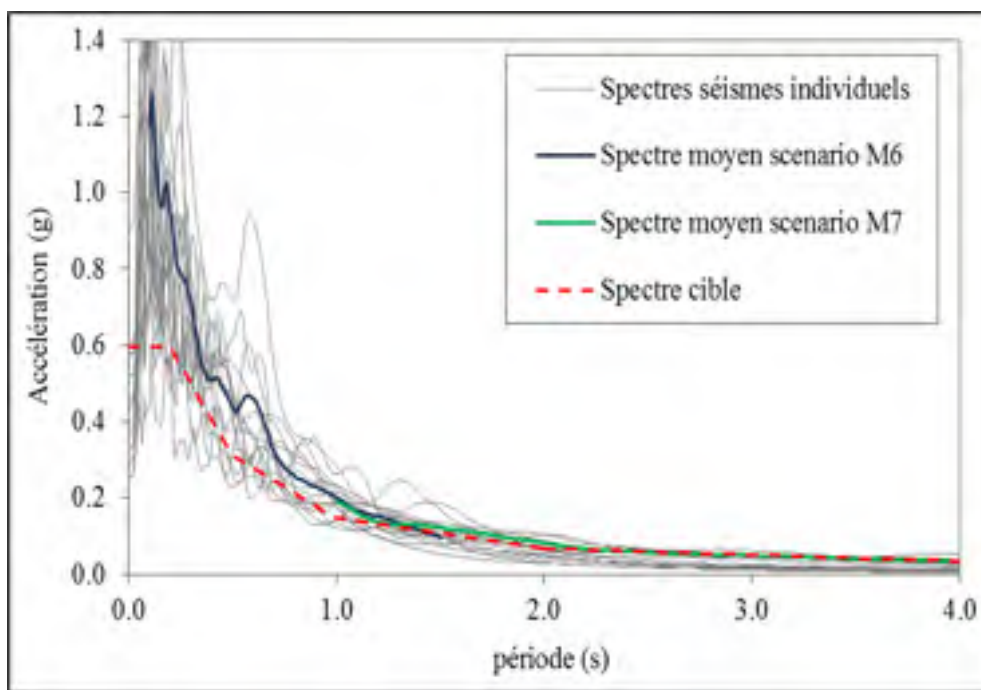


Figure 4.4 Spectre cible ainsi que les spectres individuels et moyens après calibration

Tableau 4.5 Séismes artificiels sélectionnés des scénarios 1 et 2 pour les analyses

Scenarios	Composantes	Magnitude (Mw)	Distance de la faille R (km)
1	E6C1-2	M 6,0	12,8
	E6C1-7	M 6,0	12,8
	E6C1-10	M 6,0	12,8
	E6C1-42	M 6,0	17,0
	E6C2-9	M 6,0	16,9
	E6C2-15	M 6,0	21,6
	E6C2-17	M 6,0	21,6
	E6C2-25	M 6,0	24,4
2	E7C1-3	M 7,0	13,8
	E7C1-6	M 7,0	15,3
	E7C1-25	M 7,0	19,6
	E7C1-36	M 7,0	25,2
	E7C2-1	M 7,0	41,6
	E7C2-2	M 7,0	41,6
	E7C2-5	M 7,0	50,3
	E7C2-44	M 7,0	98,6

4.6 Résultats

4.6.1 Système d'isolation en LRB

4.6.1.1 Réponse tenant compte de l'effet du raidissement thermique instantané

Les Figures 4.5(a) et 4.5(b) montrent la variation de la force maximale à la base normalisée en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24 h obtenue sous les séismes artificiels et historiques, respectivement. Comme on le voit sur les figures, la force

maximale à la base augmente avec la diminution de la température d'exposition, et cela pour les deux ensembles d'accélérogrammes historiques et artificiels considérés. Soit une augmentation de la réponse maximale moyenne en force d'environ 5% et 20% quand la température descend de 20°C à -8°C et à -30°C, respectivement.

Les Figures 4.6(a) et 4.6(b) montrent la variation du déplacement maximal normalisé en fonction de la température après 24 h de conditionnement pour les séismes artificiels et historiques, respectivement. Les résultats montrent que la réponse moyenne maximale en déplacement reste presque inchangée quand la température décroît de 20°C à -8°C pour les deux ensembles d'accélérogrammes (diminution du déplacement maximal moyen moins de 1%). À mesure que la température décroît, la réponse moyenne en déplacements diminue, soit d'environ 4% et 2,5% quand la température descend de -8°C à -30°C pour les séismes artificiels et historiques, respectivement. Cependant, il est constaté que pour certains accélérogrammes le déplacement maximal normalisé augmente légèrement avec la diminution de la température.

Ces variations de la réponse en termes de la force maximale et du déplacement maximal sont dues à l'augmentation de la rigidité latérale des isolateurs causée par l'effet des basses températures. Il est noté aussi que la force est plus influencée par cette rigidification par rapport au déplacement. Cette faible variation de la réponse en déplacement peut s'expliquer par le fait que ces analyses ne prennent pas en considération les variations de la limite élastique du noyau en plomb des isolateurs dus aux effets des basses températures et du réchauffement du noyau en plomb causé par les mouvements cycliques. Car ces effet auraient impacté la résistance caractéristique (Q_d) des isolateurs, et par conséquent de leurs réponses en termes de déplacements. Quant au déplacement maximal lequel augmente légèrement pour certains séismes malgré l'augmentation de la rigidité, ceci peut s'expliquer par les différences locales et individuelles qui peuvent exister entre les accélérogrammes en termes de contenu fréquentiel, d'amplitudes maximales des accélérations, de la distance par rapport à la source et de la durée du séisme.

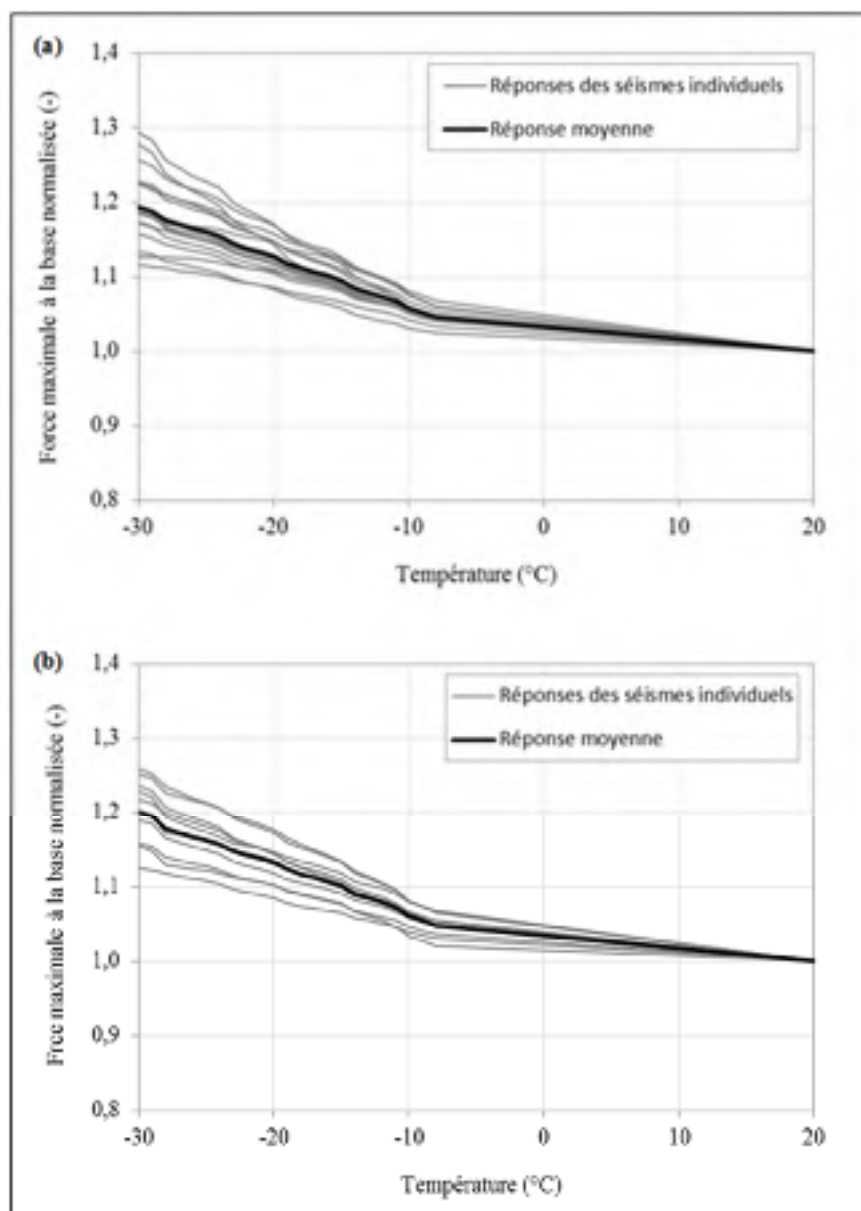


Figure 4.5 Variation de la force maximale à la base en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24 h du LRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques

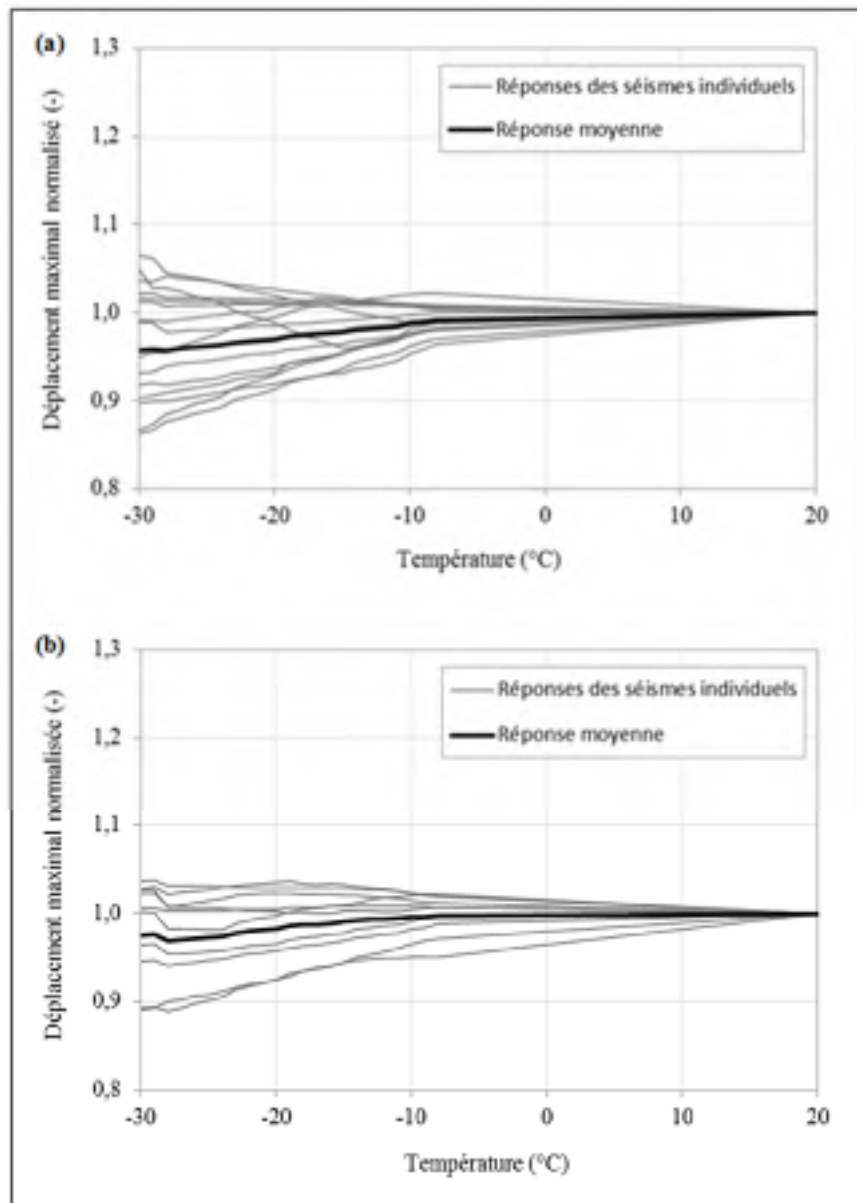


Figure 4.6 Variation du déplacement maximal en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24 h du LRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques

4.6.1.2 Réponse tenant compte de l'effet de la cristallisation à basse température

Les Figures 4.7(a) et 4.7(b) montrent la variation de la force maximale à la base normalisée en fonction de la durée de conditionnement à une température de -30°C pour les séismes artificiels et historiques, respectivement. Autant que pour le raidissement thermique

instantané, il est observé que la réponse maximale moyenne en termes de force augmente quand la durée de conditionnement augmente de 1 à 14 jours. Comparativement à 1 jour, cette augmentation est d'environ 30% et 26% après 14 jours de conditionnement pour les séismes artificiels et historiques, respectivement. L'augmentation additionnelle de la force, en plus de celle due au raidissement instantané à température de -30°C , est due à la rigidification supplémentaire des isolateurs induite par la cristallisation à basse température de l'élastomère.

Les Figures 4.8(a) et 4.8(b) montrent la variation du déplacement maximal normalisé en fonction de la durée de conditionnement à une température de -30°C pour les séismes artificiels et historiques, respectivement. Il est constaté que le déplacement maximal moyen diminue avec la durée de conditionnement, soit une diminution d'environ 5% et 9% entre 1 et 14 jours de conditionnement pour les séismes artificiels et historiques, respectivement. Similairement à la réponse en force, cette diminution additionnelle du déplacement est due à l'augmentation de la rigidité des isolateurs causée par la cristallisation de l'élastomère à basse température. Il est observé, également, de même que la réponse due à l'effet du raidissement thermique instantané, pour certains séismes, le déplacement maximal augmente malgré l'augmentation de la rigidité latérale des isolateurs. Cela peut s'expliquer par les différences qui peuvent exister entre les différents séismes.

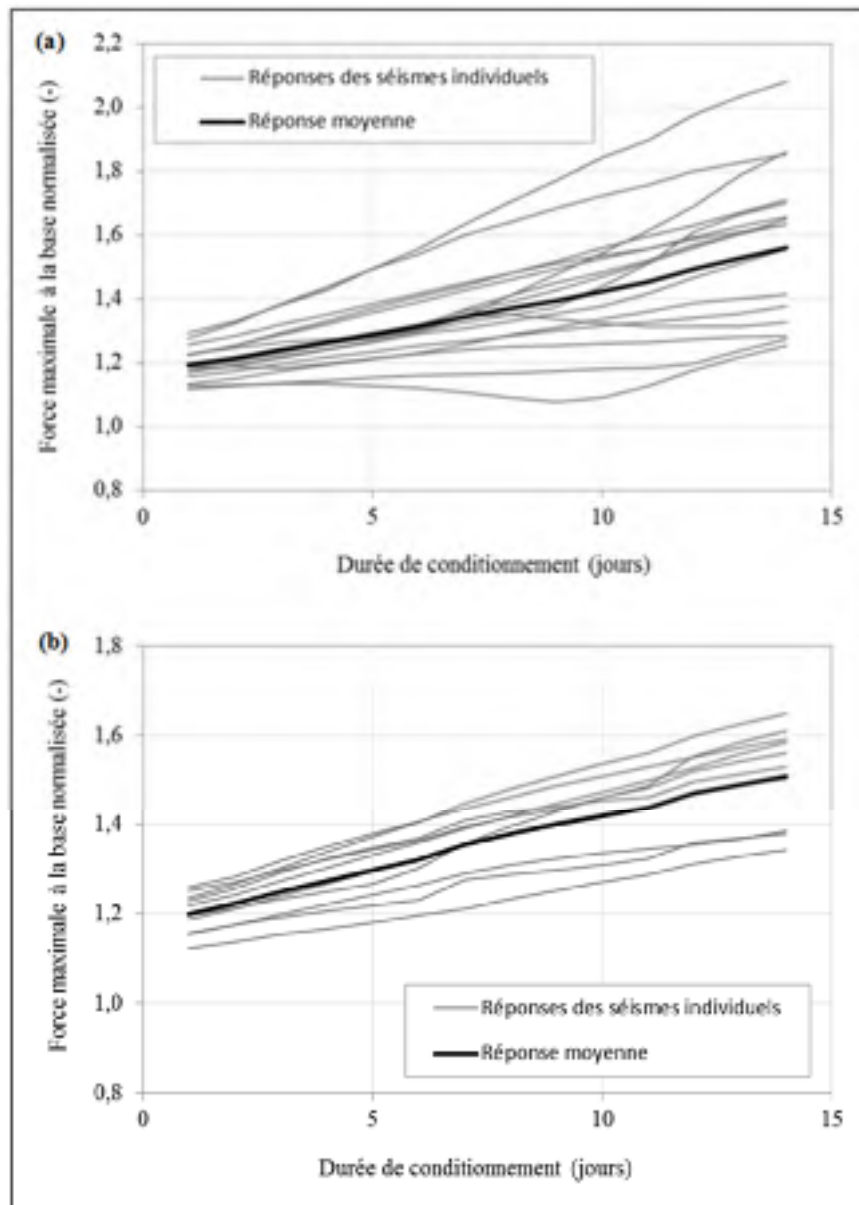


Figure 4.7 Variation de la force maximale à la base en fonction de la durée de conditionnement à -30°C du LRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques

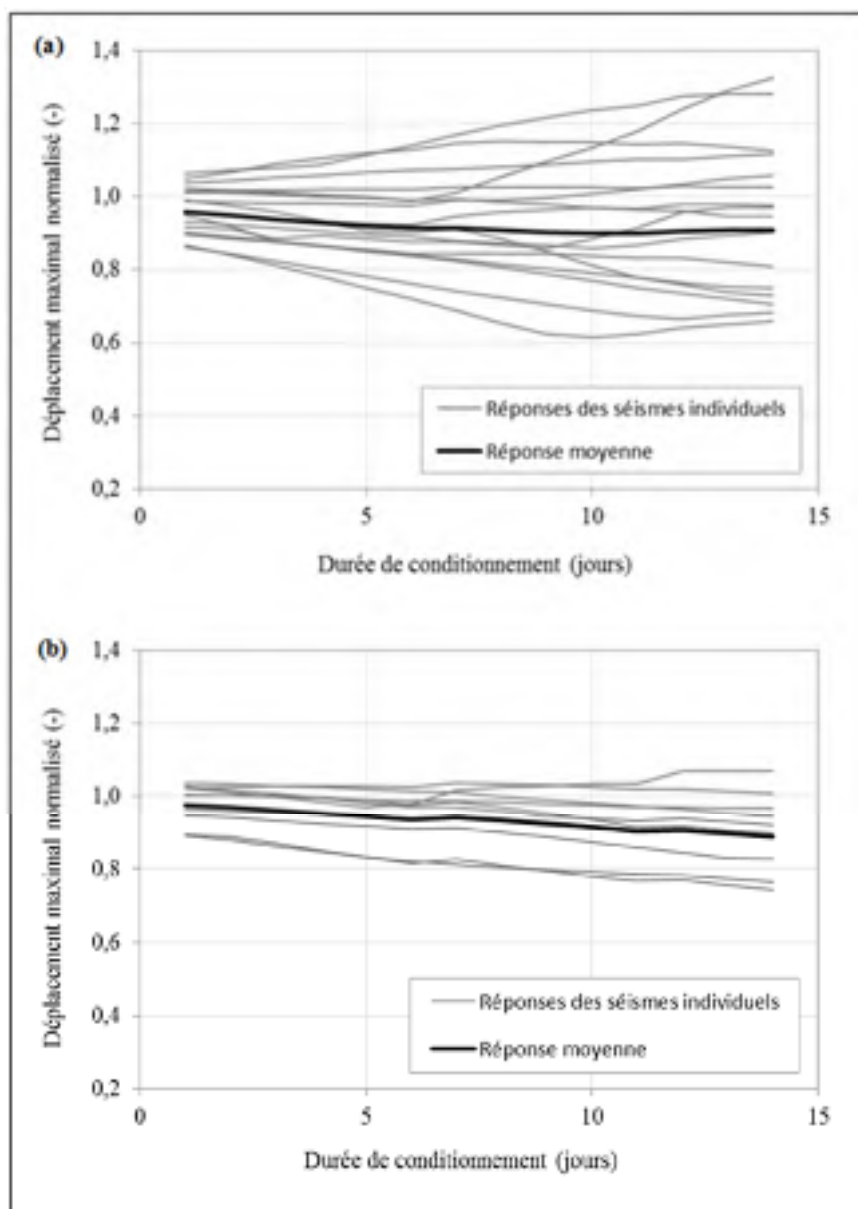


Figure 4.8 Variation du déplacement maximal en fonction de la durée de conditionnement à -30°C du LRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques

4.6.2 Système d'isolation en HDRB

4.6.2.1 Réponse tenant compte de l'effet du raidissement thermique instantané

Les Figures 4.9(a) et 4.9(b) montrent les variations de la force maximale à la base normalisée en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24 h obtenue sous les séismes artificiels et historiques, respectivement. Autant que le système d'isolation en LRB, il est observé une augmentation de la force maximale moyenne avec la diminution de la température, mais avec des proportions plus élevées. Pour les séismes historiques, la force maximale moyenne augmente d'environ 23% et 163% quand la température diminue de 20°C à -8°C et à -30°C, respectivement. Alors que pour les séismes artificiels, l'augmentation de la force maximale moyenne est d'environ 22% et 171% quand la température diminue de 20°C à -8°C et à -30°C, respectivement. Cela indique une augmentation significative du niveau de force transmis par les isolateurs à la sous-structure du pont, en particulier quand la température descend en dessous de -8°C.

Les Figures 4.10(a) et 4.10(b) montrent la variation du déplacement maximal normalisé en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24 h obtenue sous les séismes artificiels et historiques, respectivement. Pour les deux ensembles de séismes, les résultats indiquent une diminution de la réponse maximale moyenne en déplacement lorsque la température décroît de 20°C à environ -14°C, s'ensuit une légère remontée quand la température descend encore de -14°C à -30°C. Par exemple, dans le cas des séismes artificiels la réponse maximale moyenne en déplacement diminue approximativement de 27% quand la température diminue de 20°C à -14°C puis remonte d'environ 10% lorsque la température décroît encore de -14°C à -30°C. Cela indique que la réponse maximale en déplacement peut augmenter avec l'augmentation de la rigidité latérale des isolateurs. Cette augmentation du déplacement peut être expliquée par le fait qu'à très basse température la rigidité effective (K_{eff}) du système d'isolation augmente considérablement du fait des augmentations importantes des valeurs des paramètres K_d et Q_d (voir l'équation 1.1 du chapitre 1). Ainsi, l'augmentation de K_{eff} entraîne une réduction de l'amortissement

visqueux équivalent (ξ_{eq}) (voir l'équation 1.4 du chapitre 1), et par conséquent, le déplacement augmente comme indiqué à la figure 1.1 du chapitre 1. Par exemple, à température de -30°C les valeurs de K_d et de Q_d atteignent jusqu'à 2,3 et 4,9 fois leurs valeurs nominales, respectivement.

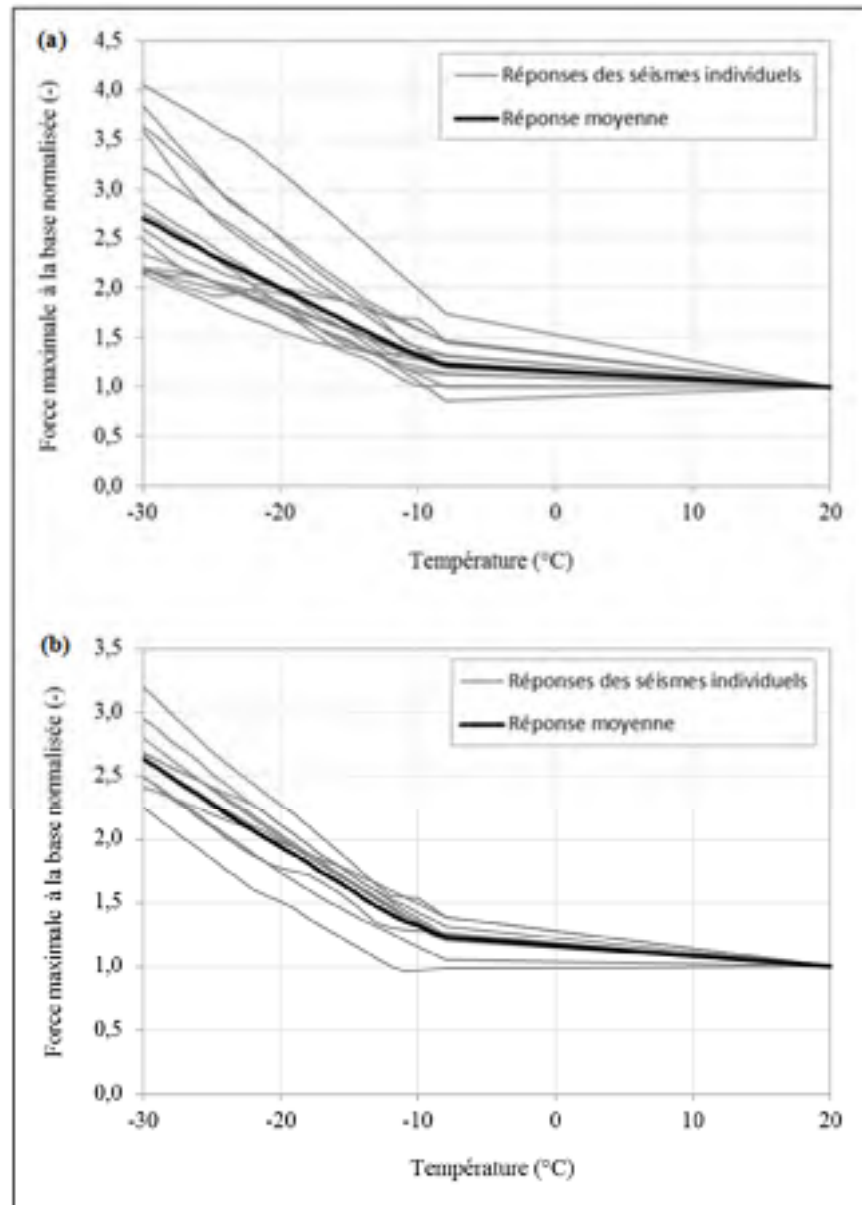


Figure 4.9 Variation de la force maximale à la base en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24h du HDRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques

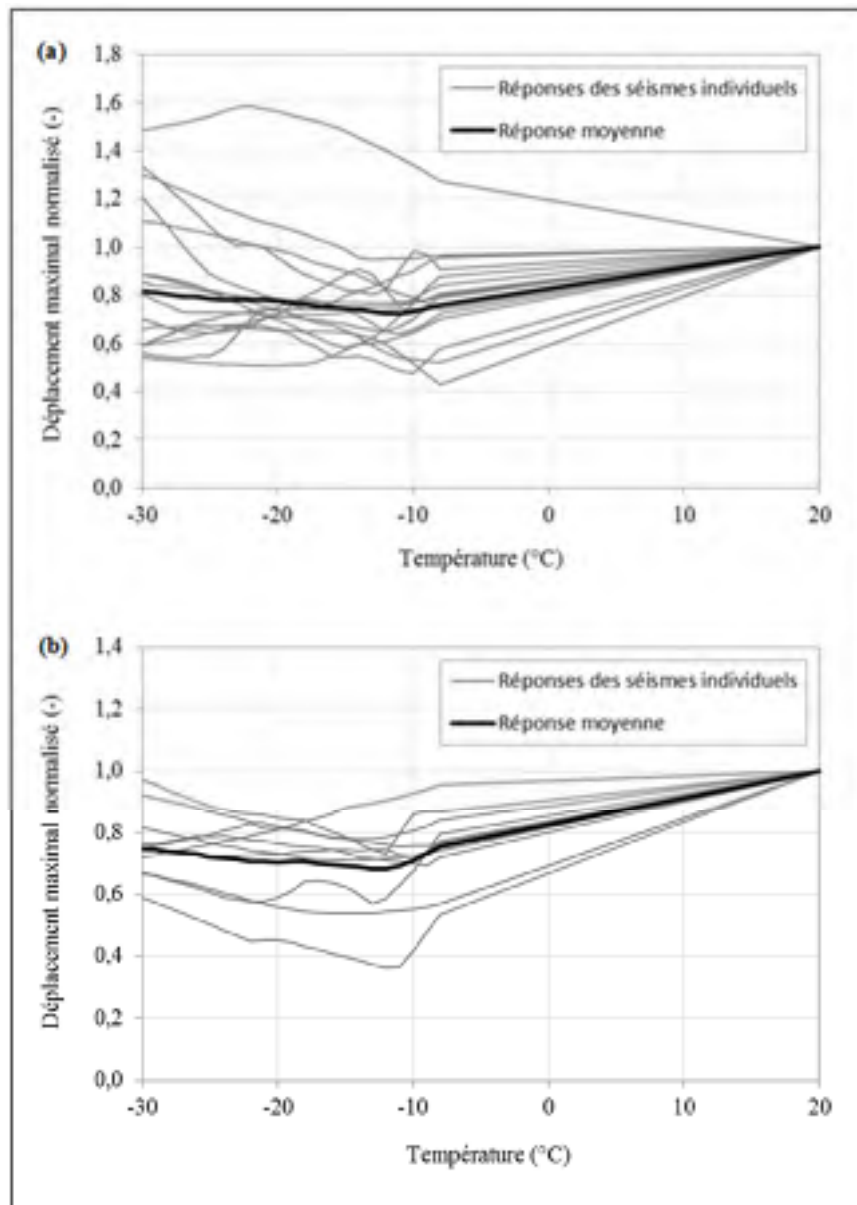


Figure 4.10 Variation du déplacement maximal en fonction de la température pour une durée de conditionnement de 24h du HDRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques

4.6.2.2 Réponse tenant compte de l'effet de la cristallisation à basse température

Les Figures 4.11(a) et 4.11(b) montrent les variations de la force maximale à la base normalisée en fonction de la durée de conditionnement à température de -30°C pour les séismes artificiels et historiques, respectivement. Il est constaté une légère augmentation de

la force avec l'augmentation de la durée de conditionnement. Soit une augmentation d'environ 9% et 8% lorsque la durée de conditionnement augmente de 1 à 14 jours pour les séismes artificiels et historiques, respectivement.

Les Figures 4.12(a) et 4.12(b) montrent les variations du déplacement maximal en fonction de la durée de conditionnement à -30°C pour les séismes artificiels et historiques, respectivement. Il est constaté que les déplacements maximaux sont pratiquement similaires lorsque la durée de conditionnement croît de 1 et 14 jours. Cela indique que les déplacements ne sont pas affectés par la cristallisation à basse température.

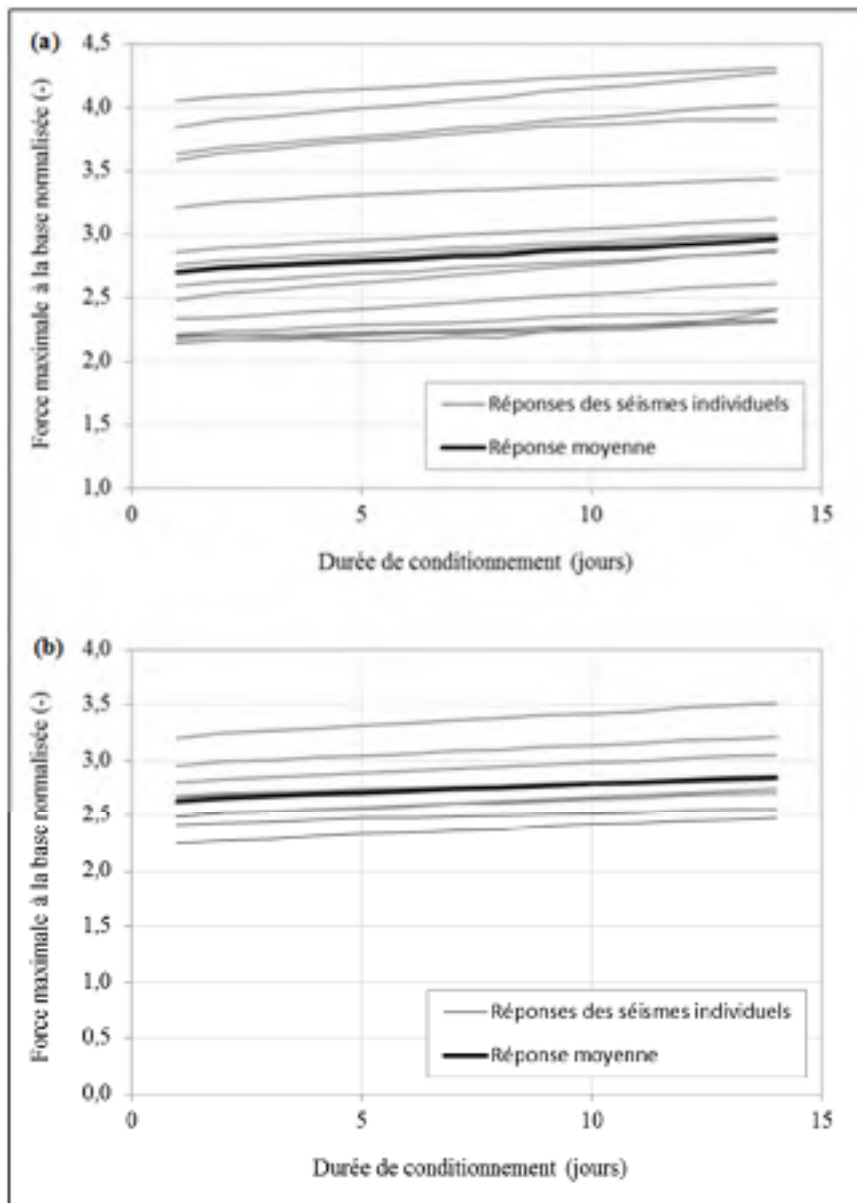


Figure 4.11 Variation de la force maximale à la base en fonction de la durée de conditionnement à -30°C du HDRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques

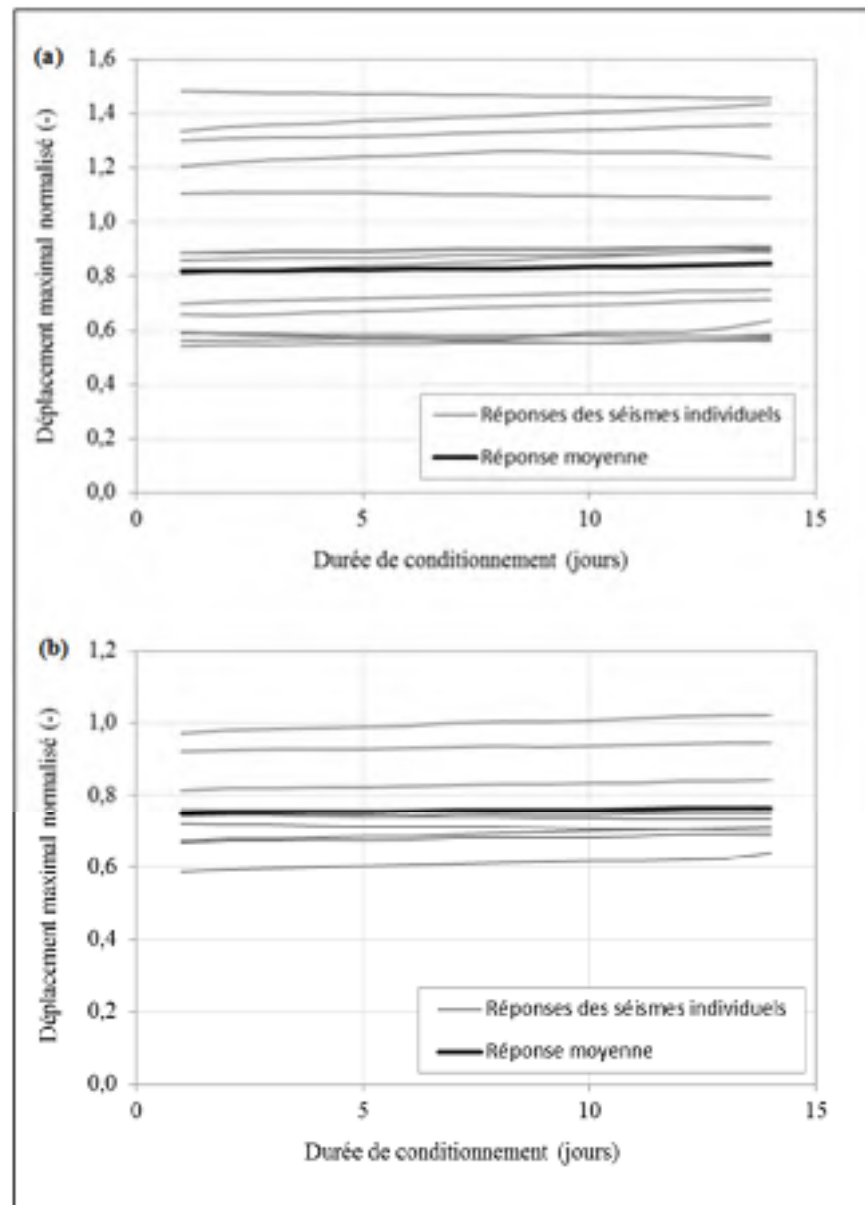


Figure 4.12 Variation du déplacement maximal en fonction de la durée de conditionnement à -30°C du HDRB sous séismes (a) artificiels (b) historiques

4.7 Interprétation des résultats

Dans le cas du système d'isolation constitué de LRB, l'effet des basses températures entraîne une augmentation de la force sismique maximale transmise par les isolateurs à la sous-structure du pont. Cette augmentation est plus importante en considérant l'effet de la

cristallisation que le raidissement thermique instantané. Le déplacement maximal, quant à lui, subi principalement une diminution sous l'effet des basses températures. Il est noté aussi que la force sismique à la base est plus influencée par les basses températures par rapport au déplacement. Toutefois, ces variations en termes de réponse maximale en force et en déplacement ne sont pas très significatives même sous l'effet de la cristallisation à basse température. Cela peut s'expliquer par le fait que dans ces analyses, uniquement la rigidité post-élastique (K_d) est modifiée et que la résistance caractéristique (Q_d) est gardée constante, vu que la variation de cette propriété est dictée essentiellement par les propriétés du noyau de plomb. Ainsi, en modifiant K_d seulement influe moins sur la réponse des systèmes d'isolations. Il y a lieu de noter aussi que les isolateurs sismiques en élastomère fretté à faible taux d'amortissement, sans noyau de plomb, seraient à priori sujet à une plus grande influence de la basse température que les LRB fait du même élastomère.

Pour ce qui est des isolateurs en HDRB, une augmentation importante de la force sismique maximale à la base due à l'effet du raidissement thermique instantané est observée, et cela pour les deux séries d'accélérogrammes historiques et artificiels considérés. Pour certains accélérogrammes, l'augmentation de la force atteint jusqu'à 4,0 fois sa valeur nominale après 24 h de conditionnement à -30°C . Cela indique une importante sensibilité de l'élastomère aux basses températures, conduisant à une augmentation significative de la rigidité latérale des isolateurs. La réponse en déplacement, quant à elle, montre une diminution avec la réduction de la température jusqu'à un certain niveau, puis remonte bien que la température décroît encore. Cela est dû à la diminution de l'amortissement visqueux équivalent (ξ_{eq}) causé par l'importante augmentation de la rigidité effective du système d'isolation, résultant des augmentations importantes des paramètres du système d'isolation, à savoir K_d et Q_d . Quant à la cristallisation à basse température, celle-ci a montré très peu d'effet sur la force sismique à la base et le déplacement du système d'isolation. Cela est attendu, car comme constaté au chapitre précédent le composé B est très peu influencé par le phénomène de la cristallisation à basses températures.

Ces résultats sont représentatifs des structures de ponts simples qui peuvent être représentés par un modèle à 1DDL avec l'hypothèse d'une sous-structure infiniment rigide. Ils sont représentatifs aussi du type et de l'intensité des deux ensembles de séismes choisis ainsi que du type de sol d'implantation de l'ouvrage considéré dans les analyses, à savoir un sol classe C selon la classification du code canadien des pont routiers (CSA, 2014a). En outre, pour le système d'isolation en LRB, les résultats se limitent à la variation du comportement de l'élastomère sous l'effet des basses températures et ne tiennent pas compte de la variation des propriétés du noyau en plomb sous l'effet des basses températures et de l'effet du chargement cyclique dynamique.

CONCLUSION

Les basses températures entraînent des augmentations de la rigidité latérale des isolateurs sismiques à base d'élastomères. Cette augmentation dépend de plusieurs paramètres, notamment du type/formulation chimique de l'élastomère constituant l'isolateur, du niveau d'exposition aux basses températures et de la durée de conditionnement. L'objectif principal du mémoire est d'étudier expérimentalement le comportement des élastomères utilisés dans la construction des isolateurs sismiques sous l'effet de leur exposition à de basses températures.

Dans la première partie du projet, trois formulations d'élastomères déjà utilisés et/ou en développement pour des applications d'isolation sismique ont été mises à l'essai à différentes basses températures et durée de conditionnement. Ces trois formulations comprennent un élastomère de type caoutchouc naturel à faible taux d'amortissement (NR) nommé composé NAT55, et deux autres élastomères de type caoutchouc naturel à amortissement élevé (HDNR), nommés composé B et composé E. Ils ont été soumis à des chargements cycliques en cisaillement d'amplitudes croissantes allant de 25 à 150%, après conditionnement à des températures d'essais de 20°C, -8°C et de -30°C pour des durées variant de 15 minutes à 14 jours. Les durées de conditionnement inférieures à 24 heures renseignent sur l'effet du raidissement thermique instantané, tandis que les durées comprises entre 24 heures et 14 jours renseignent sur l'effet de la cristallisation à basse température. Les principales conclusions qui découlent des résultats obtenus sont énumérées ci-dessous :

- le caoutchouc naturel à faible amortissement (NR) subit moins de rigidification par raidissement thermique instantané et globale par rapport aux composés à amortissement élevé (HDNR). Cependant, il est plus sensible à la durée de conditionnement (phénomène de cristallisation) à très basses températures ;

- les composés B et E sont très peu influencés par le phénomène la cristallisation à basse température, mais présentent des rigidifications dues à l'effet du raidissement thermique instantané très importantes notamment à une température de -30°C ;
- les composés d'élastomères à amortissement élevé se sont montrés très peu sujet à une cristallisation durant les 14 premiers jours de conditionnement. Cependant, il est soupçonné que la cristallisation de ces composés a été retardée par l'ajout d'additifs spécifiques. Dès lors, des essais avec des durées de conditionnement plus longues, allant à 30 jours sont recommandés pour s'en assurer. Ceci identifie une autre lacune potentielle au niveau du code, au fait que des essais sur prototypes conditionnés 14 jours, peuvent ne pas déceler de cristallisation pour certains composés. Il est donc plus approprié d'étudier expérimentalement chaque composé de manière plus poussée que de spécifier des essais sur prototype pour chaque projet ;
- l'amortissement visqueux équivalent (ξ_{eq}) augmente avec l'abaissement de la température, mais reste pratiquement inchangé avec la durée de conditionnement aux basses températures (phénomène de cristallisation) ;
- le comportement en cisaillement des élastomères sous basses températures varie avec le niveau de déformation imposé. Les élastomères présentent un comportement plus rigide et plus sensible à la basse température à des faibles déformations (inférieures à 50%), représentatives du comportement en service, qu'à des niveaux supérieurs de déformation (100 à 150%), représentatifs du comportement sismique ;
- une différence importante est observée au niveau des facteurs de modification des propriétés proposés ici et ceux donnés par le code AASHTO (2010), notamment à une température de -30°C . Cela dénote la nécessité de réaliser des essais plus poussés et spécifiques pour chaque formulation d'élastomère, lesquels doivent être validés par des essais sur prototype ;

Dans la deuxième partie du projet, les performances sous basses températures de ces élastomères ont été examinées à partir d'analyses temporelles non linéaires sur une structure de pont modélisée par un système à 1DDL. Deux systèmes d'isolation, composés d'isolateurs sismiques en LRB et en HDRB, ont été considérés dans cette étude. Les analyses ont été effectuées avec les propriétés nominales et modifiées par l'effet des basses températures, des systèmes d'isolation. Deux ensembles d'accélérogrammes constitués de séismes historiques et artificiels représentant la sismicité des régions de l'Est de Canada ont été considéré pour les analyses. L'analyse des résultats a permis de tirer les conclusions suivantes :

- le composé E présente une grande sensibilité à de très basses températures, particulièrement pour les températures aussi-basses que -30°C . Par conséquent, l'usage de ce composé en tant que système d'isolation en HDRBs n'est pas recommandé dans les régions froides où de telles températures sont rencontrées ;
- les basses températures peuvent entraîner des augmentations considérables des forces transmises par les systèmes d'isolations en élastomères à la sous-structure d'un pont. L'augmentation de ces forces dépend fortement du type et formulation chimique de l'élastomère utilisés pour la fabrication des isolateurs, et est plus importante pour les élastomères du type HDNR que pour le type NR ;
- le composé NAT55 présente des performances adéquates, en tant que système d'isolation sismique de ponts composé de LRB, à basses températures. Cela est constaté par les niveaux de variation des réponses moyennes maximales en force et déplacement calculées à basses températures. Pour des températures aussi-basses que -30°C et des durées de conditionnement allant jusqu'à 14 jours, la force moyenne est augmentée d'environ 56%, tandis que le déplacement est diminué d'environ 10% par rapport à leurs valeurs à température ambiante correspondantes. Ce qui indique que le système d'isolation garde encore sa flexibilité ;

- les résultats des analyses du système d'isolation en HDRB ont permis de constater que le composé B présente de moyennes performances à basses températures. Après 24 heures de conditionnement à -30°C , la force sismique maximale a augmenté d'environ 160% et le déplacement maximal a été réduit d'environ 20% par rapport à leurs valeurs nominales correspondantes. Ce qui montre un effet considérable des basses températures sur le système d'isolation, limitant ainsi sa flexibilité.

RECOMMANDATIONS

À la lumière des résultats et conclusions tirées dans ce projet, de futurs travaux de recherches sont recommandés.

- les élastomères ont été testés à des basses températures pour une période de conditionnement maximale de 14 jours. En conséquence, des essais supplémentaires pour de plus longues périodes de conditionnement allant à 28 jours voire 30 jours minimalement donneront plus de renseignements sur leurs périodes d'induction, notamment pour les composés d'élastomères à amortissement élevé B et E ;
- il est également très souhaitable de réaliser des essais supplémentaires à des températures intermédiaires, par exemple à -15°C , -20°C , -25°C et -40°C , afin de pouvoir prédire plus promptement l'effet de la basse température sur les propriétés mécaniques des élastomères testés ;
- les essais ont été réalisés sur des spécimens d'élastomères à échelle réduite. Cependant, il est souhaité de valider les résultats des composés élastomères par des essais sur spécimens à échelle réelle ;
- les analyses numériques ont été réalisées sur un pont modélisé par un système à 1 degré de liberté. Par conséquent, des analyses sur des modèles plus complets en 3D en considérant plusieurs configurations sont recommandées dans de futures travaux de recherche ;
- il est pertinent de se pencher sur les spécifications et exigences du code et d'identifier leur lacunes, notamment pour d'éventuels composés d'élastomères de type HDNR avec cristallisation retardée.

BIBLIOGRAPHIE

AASHTO. (2010). Guide specifications for seismic isolation design: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Arditzoglou, Y. J., Yura, J. A., & Haines, A. H. (1995). *Test methods for elastomeric bearings on bridges*.

ASTM D832. (2007). standard practice for rubber conditioning for low temperature testing

ASTM D4014. (2007). Standard specification for plain and steel-laminated elastomeric bearings for bridges.

Atkinson, G. M. (2009). Earthquake time histories compatible with the 2005 National building code of Canada uniform hazard spectrum. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(6), 991-1000.

Buckle, I. G., Constantinou, M. C., Diceli, M., & Ghasemi, H. (2006). *Seismic isolation of highway bridges*.

Calvi, G., & Kawashima, K. (2007). *Seismic bridge design and retrofit—structural solutions*. FIB.

Cardone, D., & Gesualdi, G. (2012). Experimental evaluation of the mechanical behavior of elastomeric materials for seismic applications at different air temperatures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 64(1), 127-143.

Cardone, D., Gesualdi, G., & Nigro, D. (2011). Effects of air temperature on the cyclic behavior of elastomeric seismic isolators. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(4), 1227-1255.

Ciesielski, A. (1999). *An introduction to rubber technology*. iSmithers Rapra Publishing.

Clark, P. W., Aiken, I. D., & Kelly, J. M. (1997). *Experimental studies of the ultimate behavior of seismically-isolated structures*. Earthquake Engineering Research Center, University of California.

Constantinou, M. C., Tsopelas, P., Kasalanati, A., & Wolff, E. D. (1999). Property modification factors for seismic isolation bearings.

Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M., & Warn, G. P. (2007). *Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading*.

- CSA. (2014a). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers, 10e éd. Norme nationale du Canada, CAN/CSA-S6-14. Association canadienne de normalisation et Conseil canadien des normes. Mississauga, Ont. : Association canadienne de normalisation.*
- CSA. (2014b). *Commentary on CSA S6-14, Canadian Highway Bridge Design Code. Canadian Standards Association, Mississauga, ON.*
- CSI. (2019). SAP 2000. 2019. Integrated software for structural analysis and design, version 19.2.0. Logiciel. Computerc and Structures, Berkeley, California. .
- Fuller, K. N. G., Gough, J., Pond, T. J., & Ahmadi, H. R. (1997). High damping natural rubber seismic isolators. *Journal of Structural Control*, 4(2), 19-40.
- Fuller, K. N. G., Gough, J., & Thomas, A. G. (2004). The effect of low-temperature crystallization on the mechanical behavior of rubber. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42(11), 2181-2190.
- Gent, A. N. (2012). *Engineering with rubber: how to design rubber components*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Guizani, L. (2003). Sur l'isolation sismique des ponts au Canada. Dans *In 10e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*.
- Guizani, L. (2007). Isolation sismique et technologies parasismiques pour les ponts au Québec: Mise au point. Dans *In 14e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*.
- Guruswamy, S. (1999). *Engineering properties and applications of lead alloys*. CRC Press.
- Harrabi, L. (2009). *Comportement viscoélastique à grande déformation des composites élastomères: textile utilisés dans les équipements de protection* (École de technologie supérieure).
- Kalpakidis, I. V., & Constantinou, M. C. (2008). Effects of heating and load history on the behavior of lead-rubber bearings.
- Kikuchi, M., & Aiken, I. D. (1997). An analytical hysteresis model for elastomeric seismic isolation bearings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 26(2), 215-231.
- Kim, D. K., Mander, J. B., & Chen, S. S. (1996). Temperature and Strain Rate Effects on the Seismic Performance of Elastomeric and Lead-Rubber Bearings. *Special Publication*, 164, 309-322.
- Kulak, R. F. (1999). *Recovery characteristics of high damping elastomers used in seismic isolation bearings*. Argonne National Lab.

- Kulak, R. F., & Hughes, T. H. (1993). *Frequency and temperature dependence of high damping elastomers*. Argonne National Lab., IL (United States).
- Maret, A. (2016). Étude du comportement thermodynamique d'appuis isolateurs sismiques sous chargements cycliques à basses températures.
- Morgan, T., Whittaker, A. S., & Thompson, A. (2001). Cyclic behavior of high-damping rubber bearings. Dans.
- Morton, M. (2013). *Rubber technology*. Springer Science & Business Media.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons.
- Priestley, M. J. N., Seible, F., & Calvi, G. M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley & Sons.
- Roeder, C. W., Stanton, J. F., & Feller, T. (1990). Low-temperature performance of elastomeric bearings. *Journal of Cold Regions Engineering*, 4(3), 113-132.
- Russell, E. W. (1951). The crystallization of vulcanized natural rubber at low temperatures. *Transactions of the Faraday Society*, 47, 539-552.
- Seismosoft. (2016). SeismoStruct, version 7.0. 2016. < <http://www.seismosoft.com> >
- Seismosoft. (2018). SeismoMatch, version 2018.1.1 < <http://www.seismosoft.com> >. .
- Skinner, R. I., Robinson, W. H., & McVerry, G. H. (1993). *An introduction to seismic isolation*. John Wiley & Sons.
- Stanton, J. F., & Roeder, C. W. (1982). Elastomeric bearings design, construction, and materials. *NCHRP report*, (248).
- Stevenson, A. (1983). The influence of low-temperature crystallization on the tensile elastic modulus of natural rubber. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 21(4), 553-572.
- Taylor, A. W., & Igusa, T. (2004). *Primer on seismic isolation*. ASCE publications.
- Taylor, A. W., Lin, A. N., & Martin, J. W. (1992). Performance of elastomers in isolation bearings: a literature review. *Earthquake spectra*, 8(2), 279-303.

- Thompson, A. C. T., Whittaker, A. S., Fenves, G. L., & Mahin, S. A. (2000). Property modification factors for elastomeric seismic isolation bearings. Dans. New Zealand Society for Earthquake Engineering Upper Hutt, NZ.
- Treloar, L. R. G. (1975). *The physics of rubber elasticity*. Oxford University Press, USA.
- Tremblay, R., Atkinson, G. M., Bouaanani, N., Daneshvar, P., Léger, P., & Koboevic, S. (2015). Selection and scaling of ground motion time histories for seismic analysis using NBCC 2015. Dans *11th Canadian Conference on Earthquake Engineering (11CCEE)*, Victoria, BC, Canada (Vol. 99060).
- Yakut, A. (2000). *Performance of elastomeric bridge bearings at low temperatures* (Citeseer).
- Yakut, A., & Yura, J. A. (2002). Parameters influencing performance of elastomeric bearings at low temperatures. *Journal of Structural Engineering*, 128(8), 986-994.
- Yura, J., Kumar, A., Yakut, A., Topkaya, C., Becker, E., & Collingwood, J. (2001). *Elastomeric bridge bearings: Recommended test methods*.